МИР ЗНАНИЙ

М. Г. МНЕЯН

Новые профессии магнита

Книга для внеклассного чтения учащихся 8—10 классов средней школы

МОСКВА ПРОСВЕЩЕНИЕ 1985

ББК 22.334
М73

Рецензенты:

Компанец И. М. — доктор физ.-мат. наук, Физический институт им. Лебедева АН СССР; Кабардин О. Ф. — канд. физ.-мат. наук, Научно-исследовательский институт содержания и методов обучения АПН СССР.

Мнеян М. Г.

М73 Новые профессии магнита: Кн. для внеклас. чтения учащихся 8—10 кл. сред. шк. — М.: Просвещение, 1985. — 144 с., ил. — (Мир знаний).

В книге в популярной и доступной учащимся VIII—X классов средней школы форме рассказано о природе магнитных явлений, об интересных возможностях, связанных с практическим использованием магнитов и магнитных материалов в современной науке и технике. Описываются способы получения сильных и сверхсильных полей.

М $\frac{4306020000-273}{103(03)-85}$ 165—85

ББК 22.334
537

ВВЕДЕНИЕ

С магнитом мы встречаемся везде — в природе, технике, науке, быту. Мы привыкли к магниту и порой даже не подозреваем, сколько магнитов вокруг нас. Земля, на которой мы живем, — это огромный магнит. Звезда, дающая нам жизнь, наше Солнце, — магнит еще более грандиозный. Весь окружающий нас мир буквально пронизан магнитными полями.

Что же такое магнит? Какой глубокий смысл заложен в этом понятии? Почему одни тела — магниты, а другие — нет? Почему магнит является магнитом и какие бывают магниты? В силу каких своих качеств магниты нашли такое широкое применение в самых разнообразных сферах деятельности человека?

Ответы на эти вопросы читатель получит, прочитав первые две главы данной книги. При этом он познакомится не только с физической сущностью поставленных вопросов, но также с историей формирования физических представлений о природе магнита, узнает о телах, которые принято называть магнетиками.

Необычайная общность магнитных явлений, их огромная практическая значимость, естественно, приводят к тому, что учение о магнетизме оказывается одним из важнейших разделов современной физики.

Физика магнитных явлений — наука сложная и трудная. Неискушенный читатель встретится здесь с множеством новых необычайных понятий, к которым нелегко привыкнуть. Отчетливо представляя себе это, автор стремился рассказать о магните и его свойствах языком, доступным читателю, не владеющему специальными фи-

зическими и математическими знаниями. Однако книга не предназначается для легкого, развлекательного чтения. Читателю придется проявить известное терпение, наградой за которое будет, как надеется автор, удовлетворение от чтения последующих глав.

Эти главы посвящены собственно магниту: его достижениям и применениям.

Прикладное значение магнетизма велико и продолжает возрастать. Магнит неуклонно расширяет область своих приложений, пополняет и обновляет арсенал современной науки и техники. Только за последние два-три десятилетия магнит приобрел десятки, сотни новых профессий. Тут и остроумнейшие методы регистрации и ускорения заряженных частиц, и новые методы получения энергии, и магнитная память, и многое, многое другое.

А сколько замечательных открытий сделано в наши дни при изучении свойств магнита! Новые материалы, новые удивительные устройства, новые магниты, способные соперничать с самыми сильными магнитами, созданными природой.

Автору хотелось бы, чтобы путешествие в мир магнитов было интересным читателю — ведь это мир, созданный усилиями многих изобретательных и пытливых умов. Отсюда трудность — в небольшой книжке рассказать о множестве сложнейших проблем. Признаться, сделать это оказалось очень не просто. Приходилось отбирать лишь те эффекты, результаты, проекты и устройства, которые чем-нибудь обращают на себя особое внимание. В одних случаях это неожиданность применения, в других — грандиозность проекта, в третьих — необычность эффекта и т. д. Все это, как надеется автор, должно сделать путешествие достаточно увлекательным и полезным.

ЗНАКОМЬТЕСЬ — МАГНИТ

...по какому закону природы
То происходит, что камень притягивать может железо.
Камень же этот по имени месторождения магнитом
Назван был греками, так как он найден в пределах магнетов.
Люди весьма удивляются камню такому...

Лукреций

Прежде чем начать разговор о профессиях магнита, давайте проследим за тем, как это понятие вошло в науку и какие превращения испытало в дальнейшем.

Первые шаги. Человечество открыло магнитные свойства так давно, что даже забыло, откуда происходит слово «магнит» И хотя пользоваться магнитом тоже научились давно (магнитную стрелку использовали в навигации еще в VI в. до н. э.), на протяжении столетий магнит оставался для человека неразрешимой загадкой.

Каким образом одно тело действует на другое, хотя между ними, кроме пустого пространства, нет ничего? Почему одни тела магниты, а другие нет? Наконец, почему магнит притягивает? Вопросов немало.

Века не принесли полной разгадки. Конечно, многое уже познано, многое стало более понятным, и в первую очередь природа самого магнита. И в то же время... в то же время на вопрос: Почему магнит притягивает? — мы и сегодня, строго говоря, не можем дать исчерпывающего ответа.

Как же это возможно? — спросит читатель. Как же возможно, что такое огромное и важнейшее место заняла наука, основы которой содержат какие-то неясности. Ничего парадоксального в этом нет. Магнит ставит проблемы, решение которых прямо упирается в основной вопрос — вопрос о строении вещества. И вот здесь проходит граница с областью неизведанного. Граница неустойчивая, подвергающаяся бурному натиску, но еще ни разу достаточно радикально никем не преодоленная.

Тем не менее именно с этих «простых» вопросов начиналась биография магнита. И не только потому, что дей-

ствия, производимые магнитами, поражали воображение и сами по себе побуждали искать разгадку. Главное, что в этих простейших опытах люди впервые столкнулись с прямым проявлением одного из фундаментальных законов природы. Вот почему первый «научный диспут» о магните состоялся в далекие годы до нашей эры.

Инициаторами диспута были древние греки. Греческие философы, как известно, серьезно задумывались над сущностью и происхождением окружающей природы (именно задумывались, а не ставили опытов). Было предложено много гипотез, еще больше строилось догадок. Среди этих гипотез есть и наивные, и поэтические, и откровенно фантастические.

Это и понятно. Первым исследователям необычайные свойства магнита казались чудом. Не удивительно, что древние приписывали их происхождение силам сверхъестественным и божественным. Нам сегодня кажутся наивными представления такого мыслителя античного мира, как Платон, который утверждал, что свойства магнита имеют божественное происхождение. Нас не удовлетворит и точка зрения великого Аристотеля, полагавшего, что у магнита существует «душа».

Однако в трудах древних философов можно встретить и другие, более научные воззрения. Пользуясь учением Демокрита о мельчайших, невидимых частичках, из которых построен весь наш мир, эти философы пытались последовательно объяснить разнообразные явления природы, не прибегая ни к каким сверхъестественным причинам.

Поэтично об атомном учении рассказал римский поэт и философ Тит Лукреций Кар. Замечательный образ атомного строения вещества мы находим в его бессмертной поэме «О природе вещей». Вот как, например, Лукреций описывает силы магнитного притяжения:

...Прежде всего из магнита семена выделяются
Множеством или же ток истекает, разбивая толчками
Воздух, который везде между камнем лежит и железом,
...первоначала туда стремглав понесутся железа;
Следом за тем и кольцо устремляется всем своим телом...

Конечно, эти замечательные строки, насчитывающие более 2000 лет, были только наивной догадкой. Сегодня каждый понимает, что одних размышлений и догадок (пусть даже прекрасных) недостаточно: для изучения природы нужен эксперимент.

И такой переход к эксперименту свершился. И совсем не потому, что учение древних атомистов получило свое развитие в последующие столетия жизни человечества. Наоборот, после атомистов наступил длительный, на много столетий, период забвения всякой науки.

Лишь в конце XVI в. свойства магнита вновь привлекли внимание исследователя. Им оказался английский врач Уильям Гильберт. На рубеже XVI в. Гильберт выпустил в свет книгу под названием «О магните...». С этой книги, собственно, и начинается новый, подлинно научный этап в биографии магнита. Именно Гильберт описал и сформулировал важнейшие свойства магнитов, известные сегодня каждому школьнику.

Строгий научный подход и тщательные эксперименты позволили ученому вплотную подойти к пониманию магнитных явлений. Но и Гильберту понадобилось еще говорить о некоем «испарении частиц». Правда, в его рассуждениях за словом «испарение» явно слышится слово «поле»...

Но суть даже не в этом. Уровень знаний в то время не мог позволить ученому сделать правильные выводы. Он шел первым. Нужно было очистить науку от бесконечной вереницы легенд и мифов. И это в век безраздельного господства религии!

Так постепенно рождалась наука о магните. Но прошло более ста лет, прежде чем проблема магнита вновь — и на этот раз с принципиально новых позиций — была рассмотрена учеными. В сущности продвинуться в понимании природы магнита означало построить новое физическое мировоззрение. Ведь разгадка магнита пришла совсем с другой стороны.

Для этого оказалось необходимым объединить два различных, но неразрывно связанных природой явления — *электричество* и *магнетизм.*

Новое лицо магнита. Связь или родство? Связь удалось обнаружить не сразу. Сначала было обнаружено сходство. Янтарная палочка притягивает кусочки шелка. Магнит притягивает кусочки железа. Заряд окружен электрическим полем. Магнит вокруг себя создает магнитное поле.

Поле — не фантазия Фарадея. Как бы мы ни рассматривали поле вокруг магнита, значение имеет лишь его способность совершать работу. Если вы захотите «прощупать» пространство, в каком существует магнит-

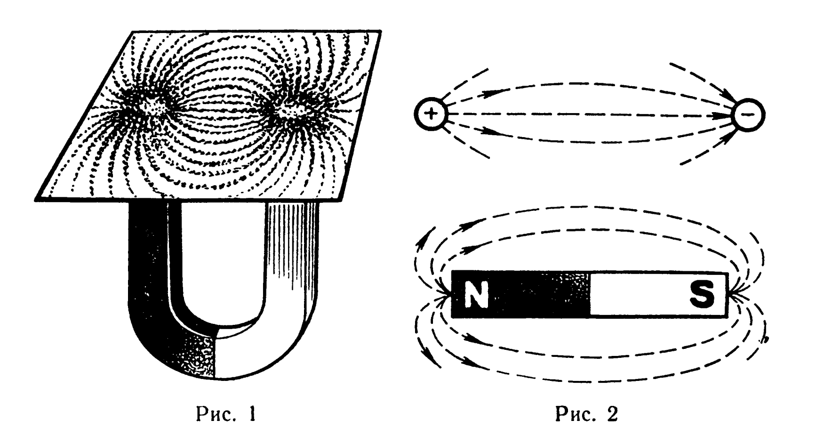


Рис. 1 Рис. 2

ное поле, насыпьте на листок бумаги железные опилки и поднесите снизу магнит — сразу же возникнут те самые линии индукции, которые дают представление о конфигурации магнитного поля (рис. 1). Линии индукции — это наглядное отображение реальных процессов, происходящих в пространстве вблизи магнитов. Магнитное поле намагничивает частички железа и может передвигать их, т. е. совершать работу.

Поле вокруг магнита оказывается удивительно похожим на электрическое поле, созданное двумя зарядами противоположного знака (рис. 2). О том, какой глубокий смысл скрывается за этим сходством, мы будем еще говорить. А пока отметим, что эта аналогия распространяется даже на количественный закон, определяющий силу взаимодействия между электрическими зарядами (или магнитными полюсами).

Количественно взаимодействие магнитов изучил Кулон. Использовал он тот же метод, что и при изучении взаимодействия зарядов. Характеризуя каждый полюс магнита определенной «магнитной массой» или «количеством магнетизма», Кулон нашел закон взаимодействия полюсов длинных магнитов. Закон этот оказался подобным закону взаимодействия электрических зарядов.

Можно было думать (вначале Гильберт, а затем и Кулон так и думали), что здесь мы имеем дело с таким же фундаментальным законом, как и в случае взаимодействия неподвижных электрических зарядов. Тогда северный полюс магнита был бы местом скопления зарядов одного вида, например положительных, а на юж-

ном полюсе был бы избыток отрицательных зарядов. Рассматривая магнитный заряд как определенное количество, мы могли бы измерить величину магнитного полюса. Как будто все последовательно.

Но вот что странно! Оказывается, что такая простая и совершенная аналогия с электрическим зарядом не может удовлетворить нас. Не может удовлетворить потому, что она противоречит опыту.

Так устроена природа. Положительный заряд и заряд отрицательный могут существовать независимо друг от друга. А полюсы магнита отделить друг от друга нельзя. Мир вокруг нас оказывается несимметричным в том смысле, что никаких магнитных зарядов вообще не существует. Никому еще не удавалось получить изолированный магнитный полюс.

Можно разрезать магнит на все более мелкие части, и все равно в каждом кусочке мы всегда получим лишь новую пару магнитов. Магнит — словно сказочный дракон: отруби ему голову — вырастает новая.

Именно это обстоятельство позволяет все же проводить различие между электричеством и магнетизмом. Магнитные полюсы встречаются в природе в виде диполей, т. е. в виде двух соединенных каким-либо естественным образом противоположных полюсов равной величины.

Каков же выход из положения? Ведь ряд факторов указывал на то, что электрические и магнитные явления каким-то образом неразрывно связаны друг с другом. Кулон считал, что открытие закона взаимодействия магнитных зарядов исчерпывает проблему магнетизма. У Эрстеда была, может быть смутная, но неотвязная мысль о том, что магнетизм может оказаться одной из скрытых форм электричества.

Так оно и оказалось. В 1820 г. Эрстед демонстрировал студентам опыты по электричеству. Поместив магнитную стрелку вблизи провода с током, он обнаружил, что стрелка отклоняется. При этом к покоящимся зарядам магнитная стрелка оставалась совершенно «равнодушной». Лишь движущиеся заряды способны были пробудить в ней «родственные чувства». Когда Эрстед замыкал цепь, магнитная стрелка вздрагивала и поворачивалась по направлению к проводнику (рис. 3). Магнетизм связан не со статическим электричеством, а с электрическим током.

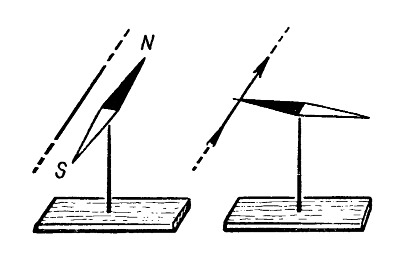


Рис. 3

Электрический ток, текущий по проводу, породил магнитное поле. Было два разных явления, а тут вдруг обнаружилось, что между ними есть неразрывная связь, и это было доказано прямым опытом.

Магнитные силы. Опыт Эрстеда показал связь между электричеством и магнетизмом. Прошло немного времени, и Ампер установил, что существуют силы, которые обусловлены только движением электрических зарядов и зависят от направления этого движения. Между нитями с током существует нечто вроде «действия на расстоянии». Возникают новые силы, которые следовало бы назвать *электродинамическими*, т. е. зависящими от движения зарядов. Однако исторически сложилось так, что дополнительные силы, возникающие между движущимися зарядами, назвали *магнитными*.

Так, наряду с кулоновским взаимодействием, которое определяется только величиной зарядов и расстоянием между ними, при движении зарядов возникает новый тип взаимодействия. Оно определяется не только зарядами и расстоянием, но и скоростью движения зарядов.

Магнитные силы существенно отличаются от электрических еще и тем, что они действуют не вдоль прямой, соединяющей взаимодействующие тела, т. е. не имеют центрального характера, как кулоновские и гравитационные. В любой данной точке пространства как направление, так и модуль силы зависят от направления движения зарядов; в каждый момент вектор силы всегда перпендикулярен вектору скорости. Кроме того, всюду вектор силы всегда перпендикулярен и определенному направлению в пространстве, с которым мы связываем вектор магнитного поля $\vec{B}$.

Магнитную силу можно легко продемонстрировать Для этого достаточно поднести к электронному лучу (можно использовать обычный школьный осциллограф) магнит или проводник с током. Светящаяся точка на экране трубки будет смещаться в зависимости от положения магнита (рис. 4). Измените полюс магнита (или направление тока в проводнике) — направление отклонения пучка электронов также изменится на противоположное.

Отклонение электронного луча указывает на то, что магнит возбуждает силы, действующие на электроны перпендикулярно как направлению их движения, так и магнитному полю. Другими словами, вектор силы перпендикулярен плоскости, проведенной через вектор скорости движущегося заряда и вектор магнитного поля $\vec{B}$.

Но этим еще не все сказано. Очень важно знать направление силы. Ведь существуют два направления, перпендикулярных к данной плоскости; эти направления взаимно противоположны. В чем они отличны? В направлении поворота, совмещающего один вектор с другим. Если поворот вектора $\vec{v}$ к вектору $\vec{B}$ на угол, меньший 180°, происходит против часовой стрелки, то эту сторону называют положительной. Положительно заряженная частица отклоняется в сторону *положительной нормали*; электроны отклоняются в обратную сторону (рис. 5).

На языке математики указанная операция определяется как *векторное произведение двух векторов*. Векторным произведением двух векторов $\vec{A}$ и $\vec{B}$ является вектор $\vec{C}$, направленный по нормали к плоскости векторов $\vec{A}$ и $\vec{B}$ в сторону осевого перемещения буравчика, рукоятка которого поворачивается от вектора $\vec{A}$ к вектору $\vec{B}$ в направлении меньшего угла α (рис. 6). Записывают так: $\vec{C}=\vec{A}\times\vec{B}$.

По модулю векторное произведение равно произведению модулей векторов $\vec{A}$ и $\vec{B}$ на синус угла между ними:

$$C = AB\sin\alpha.$$

Если векторы $\vec{A}$ и $\vec{B}$ взаимно перпендикулярны, то $C = AB$.

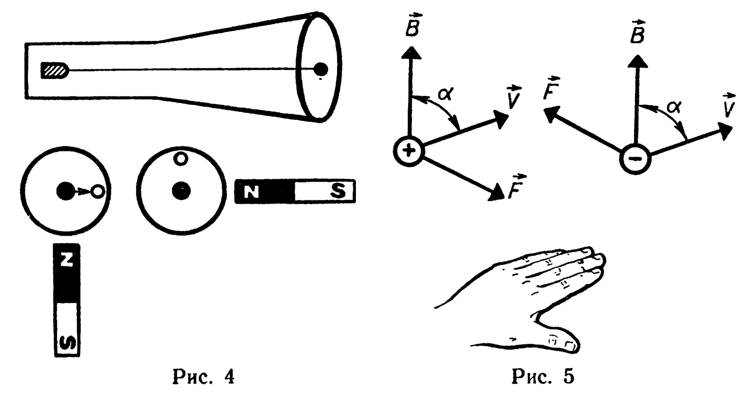


Рис. 4 Рис. 5

Если векторы $\vec{A}$ и $\vec{B}$ параллельны или антипараллельны ($\sin\alpha = 0$), то их векторное произведение равно нулю. Заметим, что при перестановке перемножаемых векторов векторное произведение меняет знак: $(\vec{B}\times\vec{A}) = -(\vec{A}\times\vec{B})$.

Таким образом, сила $\vec{F}_м$, действующая на заряд q, летящий в магнитном поле $\vec{B}$, может быть представлена в виде:

$$\vec{F} = q(\vec{v}\times\vec{B}).$$

Модуль $\vec{F}_м$ равен произведению модулей векторов $\vec{v}$ и $\vec{B}$ на синус угла между ними:

$$F_м = qvB\sin(\widehat{\vec{v}\vec{B}}).$$

Силу $\vec{F}_м$ называют *силой Лоренца*, по имени голландского физика Лоренца, который предложил эту формулу в 1895 г. Направление силы Лоренца можно определить с помощью *правила левой руки:* если расположить левую руку так, чтобы вектор $\vec{B}$ входил в ладонь, а вектор $\vec{v}$ был направлен вдоль четырех пальцев, то отставленный большой палец покажет направление силы, с которой магнитное поле действует на положительный заряд (см. рис. 5). На отрицательный заряд, движущийся в том же направлении и в таком же поле, действует сила в противоположном направлении.

С помощью силы Лоренца можно довольно просто объяснить многие очень важные явления. Тот факт, что направление вектора силы Лоренца всегда перпендикулярно к направлению вектора скорости частицы, находит широкое применение. Например, воздействуя магнитным полем на потоки разноименно заряженных частиц, их можно разделить по знаку зарядов. Но не будем забегать вперед — нам еще предстоит познакомиться с

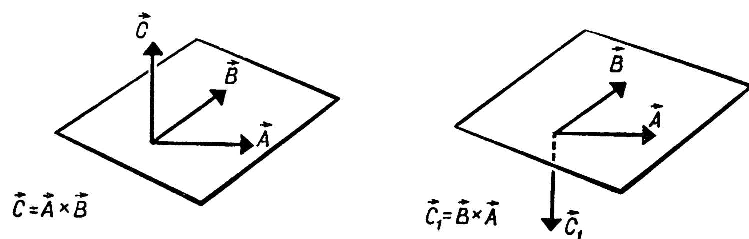


Рис. 6

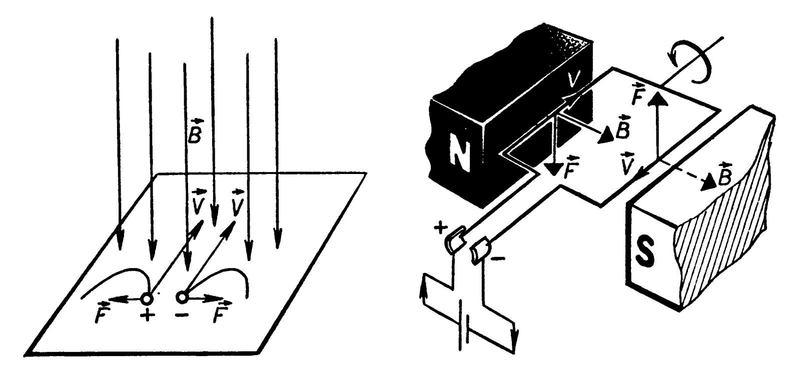


Рис. 7 Рис. 8

этим подробнее. А пока отметим два важных момента.

Вы, наверное, уже заметили, что магнитная сила равна нулю, если вектор $\vec{v}$ параллелен вектору $\vec{B}$. Это значит, что магнитное поле на заряженную частицу не действует и она летит по инерции вдоль линий индукции поля так же, как летела бы в отсутствие поля.

А какую траекторию будет описывать частица, влетевшая в однородное магнитное поле под прямым углом? Вспомните школьные уроки механики. Она будет двигаться по окружности (рис. 7). Магнитная сила, будучи перпендикулярной к направлению движения, выступает в роли центростремительной силы, и мы сразу же вычислим радиус окружности, приравнивая

$$F_{\text{ц}} = \frac{mv^2}{R} \text{ и } F_{\text{м}} = qvB.$$

Ну а в общем случае? Вращаясь по окружности в плоскости, перпендикулярной к магнитному полю, заряд вместе с тем будет двигаться равномерно вдоль поля. Результирующее движение — *спиральная траектория*. В зависимости от начального угла влета частицы в магнитное поле спираль будет состоять из густых или редких витков.

Простой, но очень важный результат.

Причины и следствия. Если пропустить электрический ток по прямоугольной рамке, помещенной между полюсами магнита, то рамка придет в движение и при этом совершается механическая работа (рис. 8). На проволоку с током, расположенную поперек магнитного поля, дейст-

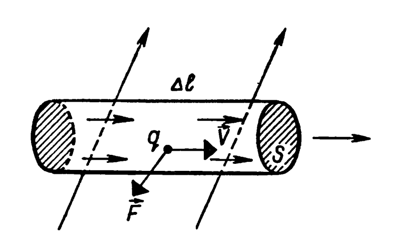


Рис. 9

вует сила, перпендикулярная и полю и проволоке. Это та самая сила, которая искривляет путь потока электронов или любых других заряженных частиц.

Когда по проволоке идет ток, заряды внутри нее движутся, т. е. имеют скорость v, и на них действует поле магнита. На каждый заряд действует поперечная сила $\vec{F}_м$ (рис. 9). Если в единичном объеме таких зарядов имеется n, то их число в малом объеме проволоки $\Delta V = \Delta l S$ равно $n \Delta l S$. Полная магнитная сила, действующая на объем ΔV, есть сумма сил, действующих на отдельные заряды, следовательно:

$$\Delta F = n\Delta\ lSqvB \sin(\widehat{\vec{v} \times \vec{B}}).$$

Учитывая, что электрический ток — не что иное, как поток движущихся зарядов, мы можем представить выражение для силы тока в виде:

$$I = qnvS.$$

Действительно, через сечение провода S за единицу времени пройдут все частицы, которые занимали объем $\Delta V = \Delta l S$, где $\Delta l = v \cdot 1$ с.

Таким образом, на участок проводника длиной l, по которому течет ток I (так называемый элемент тока $I\Delta\vec{l}$) со стороны магнитного поля $\vec{B}$, составляющего угол α с элементом тока, действует сила:

$$\Delta F = I \Delta l B \sin\alpha.$$

Это соотношение носит название *закона Ампера.* Сила ΔF называется силой Ампера; она всегда перпендикулярна элементу тока и магнитному полю. Если проводник с током расположен параллельно линиям индукции магнитного поля, то *сила Ампера* $\Delta F = 0$.

Здесь фигурирует уже знакомое вам векторное произведение: $\Delta\vec{F} = I(\Delta\vec{l} \times \vec{B})$. Вы можете проверить, что направление векторов, входящих в это выражение, согласуется с правилом левой руки (рис. 10).

Обратите внимание: магнитная сила, действующая на проволоку и возникающая от движения в ней зарядов, *не зависит от величины заряда* (и даже от его знака). Она зависит только от полного тока. Сила Ампера

является суммой сил Лоренца $\vec{F}_м$, действующих на упорядоченно движущиеся заряженные частицы, создающие электрический ток. Сила Лоренца передается сплошному проводнику, и, если ничто не удерживает проводник, он начинает ускоренно двигаться (рис. 11).

Когда проводник сдвигается, скажем, влево, можно ожидать, что сам магнит испытывает толчок вправо. Правда, эта сила чересчур мала, чтобы можно было заметить движение магнита. Однако движение более чувствительного устройства, например стрелки компаса, в поле заметно. Вокруг проводника с током создается собственное магнитное поле, которое и действует на магнитную стрелку. Значит, следует думать, что если магнитное поле будет создано током, текущим в одном проводнике, то оно будет действовать с некоторой силой и на другой проводник, по которому тоже идет ток. Это можно показать на примере двух проводников с током (рис. 12). Когда направления токов *одинаковы,* проводники *притягиваются*, а когда направления *противоположны — отталкиваются.*

Сделаем еще один шаг. Отсоединим концы проводника от источника тока и присоединим их к прибору, регистрирующему прохождение тока по проводнику. Стоит лишь в поле магнита качнуть провод, как в нем сразу же возникает ток. Здесь роль источника тока выполняет подвижный проводник. Свободные электроны проводника движутся вместе с ним; следовательно, на них будет действовать сила Лоренца, вызывающая перемещение электронов внутри проводника. Именно по такому прин-

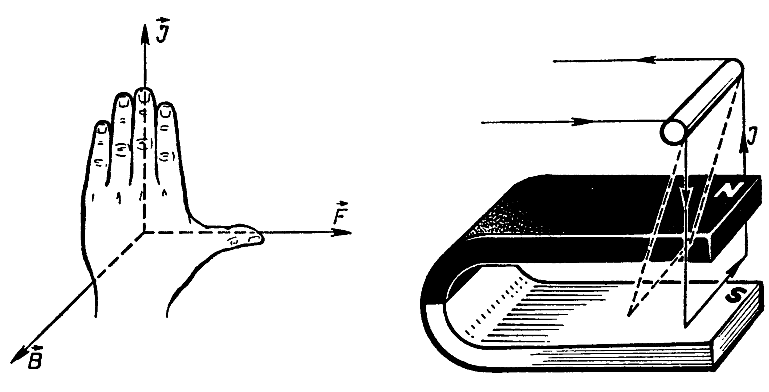


Рис. 10 Рис. 11

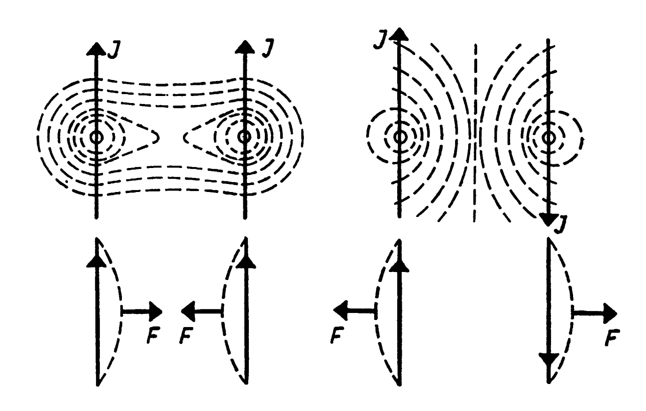


Рис. 12

ципу работают самые распространенные генераторы, преобразующие энергию механического движения в энергию электрического тока (рис. 13).

Наш опыт можно продолжить. Оставим в покое проводник и будем перемещать магнит. Никакой разницы. Прибор по-прежнему регистрирует наличие тока в цепи. Но как же магнитное поле действует на покоящиеся заряды?

Само магнитное поле, конечно, этого сделать не может. Оно ведь действует исключительно на движущиеся заряды, а проводник с находящимися в нем электронами неподвижен. Но ведь, кроме магнитного, на заряды, мы знаем, действует еще электрическое поле. Оно-то как раз может действовать и на неподвижные заряды. Электроны ускоряются электрическим полем, и это поле порождается переменным магнитным полем.

Итак, мы приходим к выводу, важность которого трудно переоценить: ток может возникнуть в замкнутом проводнике, хотя в цепь не входят источники тока. Это явление, которое, можно сказать, лежит в основе всей современной электротехники, носит название *электромагнитной индукции*. Проводник с его запасом свободных электронов — просто индикатор (регистратор) возникающего электрического поля: оно приводит в движение электроны в проводнике и тем самым обнаруживает себя.

Таким образом, магнитное поле способно в определенных условиях порождать электрическое без помощи зарядов. Меняя магнитное поле вблизи проводника, можно создать в проводнике ток. Ток течет по проводнику, а в

пространстве взаимодействуют электрические и магнитные силы.

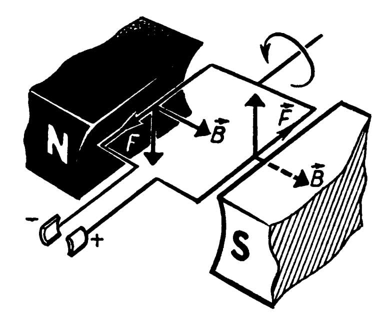


Рис. 13

Итак, магниты действуют на другие магниты и токи, а токи в свою очередь действуют на другие токи и магниты. Для описания этих взаимодействий, так же как и электрических, удобно ввести понятие поля. Мы говорим, что магниты и токи создают в окружающем их пространстве магнитное поле. Магнит, ток или любая движущаяся частица, находящиеся в этом поле, испытывают действие силы, пропорциональной интенсивности магнитного поля.

Мера магнитного поля. Поле — это не отвлеченный образ, к которому вынуждены прибегать физики для того, чтобы объяснить взаимодействие тел. Поле существует реально, так же как реально существует вещество. Поле является одним из видов материи.

Обнаружить и измерить магнитное поле нам помогают приборы. Простейшим устройством, с помощью которого можно обнаружить действие магнитного поля, является магнитная стрелка, известная естествоиспытателям с давних пор. Но магнитная стрелка — своего рода вещь в себе. Она позволяет узнать направление действующей на нее силы; если же мы хотим узнать модуль этой силы, то последняя зависит и от магнитных свойств самой стрелки. Так что мы должны одновременно искать меру интенсивности магнитного поля и меру, характеризующую стрелку.

Затруднения подобного рода можно устранить, если воспользоваться измерительным устройством в виде маленького витка (рамки) с током. Такой виток и сам является источником магнитного поля и испытывает действие со стороны магнитного поля какого-то другого источника. Поэтому размеры витка должны быть столь малыми, чтобы в его пределах магнитное поле можно было бы считать однородным.

Виток помещается в область изучаемого магнитного поля (рис. 14). Магнитное поле оказывает на виток ориентирующее действие — поворачивает виток, устанавли-

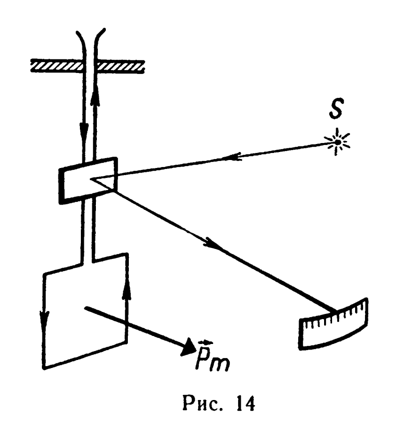


Рис. 14

вая его в конечном итоге в определенном положении. Угол закручивания нити измеряется по отклонению светового зайчика, который отбрасывается зеркальцем на шкалу. Зная упругие свойства нити и угол ее закручивания, можно определить момент сил M, поворачивающий виток в магнитном поле.

Опыт показывает, что для одной и той же точки определенного магнитного поля максимальный момент сил M_{max} пропорционален силе тока в витке I и его площади S: $M \sim IS$ (форма витка: круг, квадрат и т. д., значения не имеет). При этом оказывается, что отношение M/IS для выбранной точки поля остается постоянным: оно не зависит от свойств витка и поэтому может служить *характеристикой магнитного поля*. Это отношение называется *магнитной индукцией* и обозначается буквой B:

$$B = \frac{M_{max}}{IS}.$$

Величину $p_m = IS$ называют *магнитным моментом витка*. Для кругового тока $p_m = \pi R^2 I$, где R — радиус круга. За единицу магнитного момента в СИ принимается *ампер, умноженный на квадратный метр* (А • м^2).

Магнитный момент можно рассматривать как вектор, приписав ему направление положительной нормали. Направление положительной нормали, и тем самым направление вектора магнитного момента, находится по *правилу правого винта:* если вращать рукоятку буравчика с правой резьбой по направлению тока в витке, то поступательное движение винта покажет направление вектора магнитного момента $\vec{p}_m$.

В магнитном поле виток ориентируется так, что вектор $\vec{p}_m$ совпадает по направлению с вектором магнитной индукции $\vec{B}$. Вращающий момент M будет максимальным, когда вектор $\vec{p}_m$ перпендикулярен вектору $\vec{B}$. Таким образом, магнитная индукция — векторная величина, численно равная максимальному моменту силы, действующей на виток с единичным магнитным мо-

ментом. Вектор $\vec{B}$ является *силовой характеристикой магнитного поля,* так как связан с силовым действием этого поля на виток с током.

За единицу магнитной индукции в СИ принята магнитная индукция поля, в котором на виток площадью 1 $м^2$ при силе тока 1 А действует максимальный момент 1 Н • м. Эта единица получила название *тесла* (Тл): 1 Тл = 1 Н/А • м. Произведя простые преобразования, можно показать, что 1 Тл = 1 Н/А • м = Дж с/Кл • $м^2$ = = 1 В • с/$м^2$.

Влияние среды на модуль магнитной индукции. Относительная магнитная проницаемость. Определяя на опыте силу воздействия магнитного поля заданных источников на элемент тока, помещенный в различные вещества, мы убеждаемся, что ее значения, при прочих равных условиях, в различных средах будут разными. Это значит, что магнитная индукция зависит еще и от свойств среды, т. е. ей можно приписать некоторое собственное магнитное поле.

Результирующее магнитное поле в веществе характеризуется магнитной индукцией $\vec{B}$, равной векторной сумме индукций внешнего ($\vec{B}_0$) и внутреннего $\vec{B}_i$ магнитных полей:

$$\vec{B} = \vec{B}_0 + \vec{B}_i.$$

Для того чтобы определить степень участия вещества (например, железа) в создании магнитного поля $\vec{B}$, находят отношение числовых значений:

$$\frac{B}{B_0} = 1 + \frac{B_i}{B_0} \text{ или } \quad = 1 + \frac{B_i}{B_0}.$$

Отношение $B/B_0 = \mu$ называется *относительной магнитной проницаемостью* (аналог относительной диэлектрической проницаемости). Величина μ показывает, во сколько раз магнитная индукция в среде отличается от магнитной индукции в вакууме. Магнитная проницаемость характеризует магнитные свойства вещества; она зависит от рода вещества и его состояния (например, от температуры), μ— *величина безразмерная.*

Наряду с вектором магнитной индукции $\vec{B}$, который характеризует силовое действие магнитного поля на движущиеся заряды, часто вводят вспомогательный вектор $\vec{H}$, называемый *напряженностью магнитного поля.*

Напряженность связана с магнитной индукцией следующими соотношениями:

$$\vec{H} = \frac{\vec{B}_0}{\mu_0} \text{ или } \vec{H} = \frac{\vec{B}}{\mu\mu_0}.$$

В этом уравнении μ_0 — размерный постоянный коэффициент, называемый магнитной постоянной, которая в системе СИ имеет значение $\mu_0 = 4\pi \cdot 10^{-7}$ Н/А². Таким образом, напряженность $\vec{H}$ тоже является силовой характеристикой магнитного поля, но уже не зависящей от свойств среды, если среда однородна. Единицей напряженности магнитного поля в системе СИ является ампер на метр (А/м). Эта единица специального названия не имеет.

Заметим, что, хотя вектор $\vec{B}$ называют вектором магнитной индукции, а $\vec{H}$ — магнитным полем, истинный смысл состоит в том, что $\vec{B}$ (а не $\vec{H}$) есть среднее магнитное поле в среде. Можно сказать, что название «вектор индукции» магнитного поля неточно, что правильнее было бы вектор $\vec{B}$ называть вектором напряженности магнитного поля. По аналогии с учением об электрическом поле, где силовой вектор $\vec{E}$ называется напряженностью, следовало бы и в учении о магнетизме называть силовой вектор $\vec{B}$ напряженностью. И все же принято называть магнитным полем вектор $\vec{H}$, а не $\vec{B}$. Путаница в терминологии возникла еще тогда, когда физический смысл векторов поля $\vec{B}$ и $\vec{H}$ был недостаточно ясен. Надеемся, это несоответствие названия и смысла не приведет к недоразумениям.

Линии магнитной индукции. Следя за направлением вектора индукции магнитного поля, можно построить картину линий магнитной индукции, представляющих наглядную интерпретацию поля.

Такая картина приводится на рисунке 15. Конфигурация однородного магнитного поля — это ряд равномерно идущих параллельных линий, а силовые линии токов — это окружности. При этом если смотреть вдоль тока, то линии будут иметь направление, по которому движется часовая стрелка. Если хотите, это можно считать правилом правого винта.

Смысл этих картинок следующий: касательные к линии в каждой точке пространства совпадают по на-

правлению с вектором индукции магнитного поля. Они как бы следуют за вектором $\vec{B}$ и сохраняют направление поля. Чем больше модуль вектора индукции $\vec{B}$, тем гуще располагаются линии. При этом линии магнитной индукции, так же как и силовые линии электрического поля, никогда не могут пересекаться или быть касательными друг другу.

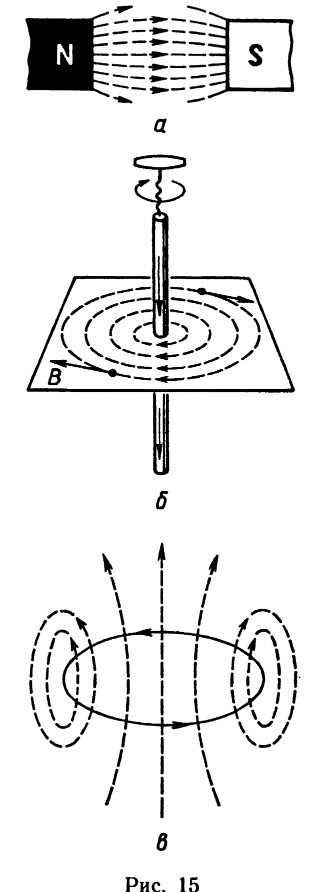


Рис. 15

Изображая магнитное поле с помощью линий индукции, можно проводить их через перпендикулярную к ним единичную площадку в количестве, равном численному значению вектора магнитной индукции в месте расположения этой площадки. Тогда поток вектора магнитной индукции, или магнитный поток Ф, будет равен общему числу линий индукции магнитного поля, пересекающих расположенную нормально к ним поверхность площадью $S_{\perp}$: $\Phi_m = BS_{\perp}$. Единицу магнитного потока в СИ называют *вебером* (Вб). 1 Вб = 1 Тл · м^2.

Таким образом, по густоте линий индукции, проходящих через единичную площадку $S_{\perp}$, мы можем судить о значении потока Φ_m и изображать его графически. Конечно, не следует забывать, что в действительности существуют не силовые линии, а сами поля.

И еще. Если говорить о линиях вектора магнитной индукции, то они всегда замкнуты — нигде не начинаются и нигде не кончаются. Этот факт отражает фундаментальное свойство магнитного поля: не бывает магнитных зарядов, из которых могли бы исходить линии магнитного поля. Но тогда откуда же они берутся?

Магнитные поля появляются лишь в присутствии токов. Когда есть токи, есть и линии магнитного поля, образующие замкнутые петли.

А как же быть с магнитом? Не может ли оказаться так, что магнитное поле, созданное куском железа, на самом деле есть результат действия токов?

Гипотеза Ампера об элементарных токах. Обратимся к простой модели, которая поможет нам пояснить суть дела. В проводе, свитом в виде длинной спирали — такая спираль называется *соленоидом*, — магнитные линии работают коллективно. Их усилия складываются в общий поток, направленный вдоль оси соленоида. Вне спирали они расходятся и возвращаются в соленоид с другого конца. В точности такая же картина наблюдается вне намагниченного стержня (рис. 16).

Соленоид во всем подобен магниту. Если его поместить во внешнее магнитное поле, то он, так же как и магнит, стремится ориентироваться вдоль силовых линий поля. Он ведет себя так, как будто имеет на концах полюсы, которые притягивают или отталкивают полюсы других магнитов. Это наводит на мысль, что магнит представляет собой не что иное, как соленоид, состоящий из неких «таинственных», никогда не исчезающих токов.

Впервые эта замечательная мысль была высказана Ампером. Пытаясь объяснить поведение намагниченного стержня, он предположил, что «магнит в действительности представляет собой соленоид, в который вделан ток, текущий по его внешней поверхности. ...из простого сопоставления фактов мне представляется невозможным сомневаться в том, что такие токи действительно текут вокруг оси магнита».

Но откуда берется этот непрерывный ток? Согласно гипотезе Ампера внутри молекул вещества циркулируют некие токи — своеобразные *элементарные магнитики*. Когда эти токи-магнитики расположены хаотично, то их

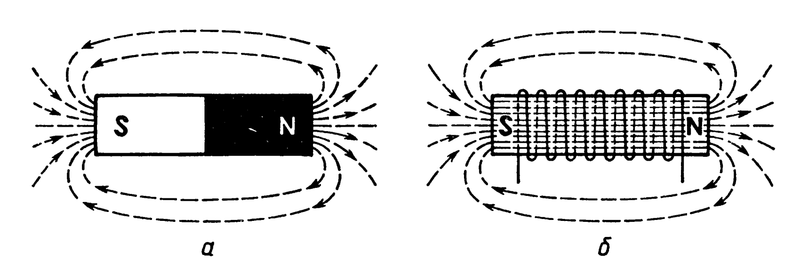


Рис. 16

действие компенсируется и никаких магнитных свойств тело не обнаруживает.

В намагниченном состоянии эти магнитики в теле выстраиваются таким образом, что их действия складываются.

Давайте внимательно подумаем над этой идеей. Прежде всего мы видим, что она объясняет появление новых полюсов при делении магнита на части. С точки зрения теории Ампера каждый элементарный магнитик представляет собой круговой виток тока, одна сторона которого соответствует северному, другая — южному полюсу. Попробуйте отделить одну сторону плоскости от другой! Неразделимость магнитных полюсов полностью потеряла свою загадочность. Нет магнитных зарядов, и нечего делить. Магнитная «душа» — это микроскопические электрические токи!

Впервые человек стал ощущать дыхание магнита не с помощью поэтических откровений, а на пути более точного познания. Но прошло почти столетие, прежде чем человек обнаружил, что цепи амперовых токов точно соответствуют движению электронов в атоме.

Элементарные носители магнетизма. Известно, что атомы всех веществ содержат в себе электроны, вращающиеся по определенным орбитам вокруг положительно заряженного ядра.

Электроны настолько подвижны, что в течение каждой секунды успевают повторить свой пробег вокруг ядра до пятисот триллионов раз! Естественно было предположить, что движущиеся вокруг массивного ядра электроны, несущие в себе крошечную порцию электричества — отрицательный заряд e, равный $1{,}6 \cdot 10^{-19}$ Кл, — и есть те самые элементарные токи, которые и являются *элементарными носителями магнетизма.*

Положим, что электрон вращается по круговой орбите радиусом R. Так как сила тока равняется заряду, переносимому в единицу времени, то вращающийся электрон можно уподобить силе тока, равной $I = e\nu$, где ν — частота обращения частицы. Скорость частицы можно связать с частотой соотношением $v = 2\pi R\nu$. Отсюда следует, что сила тока I равна: $I = \frac{v \cdot e}{2\pi R}$,
а магнитный момент электрона, движущегося вокруг ядра (его называют *орбитальным*):

$$p_m = IS = \frac{ve}{2\pi R}\pi R^2 = \frac{evR}{2}.$$

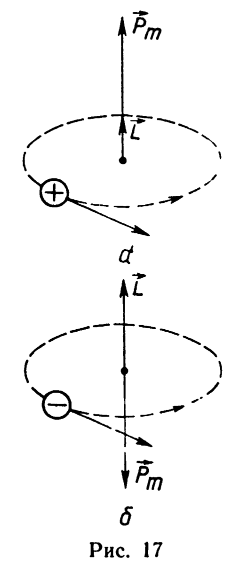


Рис. 17

Двигаясь по орбите вокруг некоторого центра (ядра), электрон наряду с магнитным моментом обладает также *орбитальным механическим моментом — моментом импульса.* Момент импульса — величина векторная. Его численное значение определяется произведением импульса частицы $m_e v$ (m_e — масса электрона) на радиус:

$$L = m_e vR,$$

а направление в соответствии с правилом правого винта перпендикулярно к плоскости орбиты (рис. 17).

Между магнитным моментом $\vec{p}_m$ и механическим моментом существует связь:

$$\vec{p}_m = \frac{e}{2m_e}\vec{L}.$$

Обратите внимание: это соотношение содержит только фундаментальные постоянные, и это заставляет предположить, что оно справедливо *всегда.* Отношение p_m/L не зависит ни от скорости, ни от радиуса орбиты. Там, где постоянен момент импульса, модуль и направление магнитного момента также остаются неизменными.

Это один из правильных выводов теории. Но если развивать его дальше по пути классической физики, то можно натолкнуться и на неправильные ответы. Скажем сразу, движение микрочастиц, в том числе и электрона, подчиняется правилам не классической механики, а квантовой. Не будь квантовой механики, мы были бы совершенно беспомощными перед загадками, которые задает нам магнит. Здесь в полном смысле слова «царство» микрофизики со всем тем, что нередко кажется парадоксальным с точки зрения наших привычных представлений.

Момент импульса, если оставаться на позициях классической механики, может быть любым: от нуля до $m_e vR$. Верно ли это в квантовой механике? В сущности да, но лишь в общем случае. Орбитальный механический момент L может принимать только некоторые, вполне определенные значения, кратные $h/2\pi$, т. е.

$$L = n\,\frac{h}{2\pi},$$

где $n = 1, 2, 3, \ldots$, а h — знаменитая постоянная Планка, равная $6{,}62 \cdot 10^{-34}$ Дж/с.

Таким образом, $h/2\pi$ — *наименьшее значение момента импульса,* которое может иметь электрон, двигаясь по орбите. На квантовом языке это означает, что *механический момент квантуется.* Квантование механического момента, так же как и квантование энергии, является общим законом природы, из которого строго вытекают самые различные следствия, подтверждающиеся на опыте.

Вы, должно быть, уже заметили, что квантуется не только механический, но и магнитный момент. Действительно:

$$p_m = L \frac{e}{2m_e} = n \frac{h}{2\pi} \frac{e}{2m_e} = n\mu_Б.$$

Величина $\mu_Б = \dfrac{h}{2\pi} \dfrac{e}{2m_e} = 0{,}927 \cdot 10^{-23}$ Дж/Тл ($9{,}27 \cdot 10^{-24}$ А $\cdot$ м^2) называется *магнитоном Бора,* в честь Н. Бора, который ввел эту величину. Она составлена из мировых констант — заряда, массы электрона и постоянной Планка — и поэтому тоже является мировой константой.

Магнетон Бора и есть элементарный электронный магнитный момент. Это *наименьшее значение магнитного момента,* которое может иметь электрон.

Но этот правильный, вообще говоря, вывод касается лишь одной стороны явления. Той, которая связана с движением электрона по орбите вокруг ядра. Однако это не единственное место, где мы встречаемся с магнетизмом. Электрон, кроме того, ведет себя таким образом, как будто постоянно вращается округ собственной оси. Это свойство электрона называется *спином* (рис. 18).

Спин наглядно соответствует *как бы* собственным вращениям частиц. Обратите внимание на это «как бы» и не пытайтесь представлять себе что-то подобное волчкам и шарикам, вращающимся вокруг собственной оси. Это ни в коей мере, даже самой грубой, не соответствует действительности. *Спин — внутреннее свойство частицы,* как масса и заряд. Электрон, протон не могут расстаться со своим спином, как не могут потерять часть своего заряда или массы. Поэтому электрону (а поз-

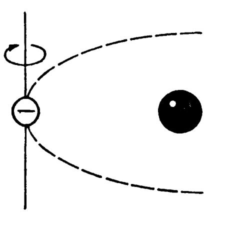


Рис. 18

же оказалось и любой элементарной частице) надо приписать собственный момент импульса (спин) и соответственно собственный магнитный момент.

Количественное значение спина точно известно: он равен либо нулю, либо $\frac{1}{2}\frac{h}{2\pi}$, либо $\frac{h}{2\pi}$. У электрона спин равен $\frac{1}{2}\frac{h}{2\pi}$ (т. е. половине наименьшего орбитального механического момента) и может располагаться в двух направлениях — вдоль поля и против поля. Что же касается магнитного момента электрона, то он, следуя за спином, также может иметь лишь две ориентации в поле, а численное значение его равно в точности одному магнетону Бора.

Что мы узнали. Итак, высказанная Ампером гипотеза о наличии внутри вещества элементарных токов оказалась весьма плодотворной. Она была лишь несколько уточнена: магнитные поля создаются не только движущимися электрическими зарядами. Оказалось, что электроны, сами по себе, даже неподвижные, являются источниками магнитного поля. Каждый электрон несет в себе не только заряд, но и является маленьким магнитиком.

Но атом, как известно, сложная система. Ядро атома состоит из протонов и нейтронов, каждый из которых обладает магнитным моментом, причем эти моменты могут быть ориентированы различно. Вокруг ядра атома вращаются электроны, обладающие как орбитальным, так и собственным, спиновым, магнитным моментом.

Таким образом, магнитный момент атома — величина суммарная, причем сумма эта довольно сложным образом учитывает как численные значения магнитных моментов отдельных частиц, так и их направления. Правда, магнитные моменты таких частиц, как протоны и нейтроны, значительно меньше магнитных моментов электронов. Поэтому во многих случаях ими можно пренебречь и считать, что магнитные свойства атома определяются в основном магнитными свойствами электронов. Именно электроны играют главную роль в магнитных свойствах тел различной природы.

Тот факт, что все атомы в той или иной степени магнитны, имеет совершенно общее значение. Атомов, на которые бы не действовало магнитное поле, не существует. Следовательно, немагнитных веществ также не существует; все тела в той или иной степени магнит-

ны, поскольку магнитны атомы, из которых они состоят

Магнетизм вещества. Начнем с характерного примера, который в различных вариантах часто привлекается для иллюстрации магнитных свойств вещества.

Пусть у нас имеется магнит, у которого магнитное поле неоднородно: один из полюсных наконечников заострен, а другой — плоский (рис. 19). Магнитное поле у заостренного полюса намного сильнее, нежели у плоского.

Поместим теперь в это поле различные вещества и посмотрим, действует ли на них сила. Действие этой силы можно обнаружить по смещению подвешенного кусочка материала при повороте магнита. Мы замечаем, что одни вещества сильнее притягиваются заостренным полюсом, другие — слабее. А есть и такие, которые не притягиваются заостренным полюсом, а, наоборот, выталкиваются из области сильного поля. По-видимому, мы имеем здесь дело с несколькими различными явлениями. Попытаемся провести некоторую классификацию этих явлений.

Материал, обладающий сильными магнитными свойствами, — железо. Вещества, ведущие себя в магнитном поле подобно железу, называются *ферромагнетиками.* Ферромагнетики относятся к классу *сильномагнитных веществ.*

Слабый магнетизм бывает двух видов. Вещества, втягиваемые в область сильного поля и обладающие магнитными свойствами, хотя и не столь ярко выраженными, называются *парамагнетиками.* Вещества, которые выталкиваются из области сильного поля, — *диамагнетиками.*

Магнитное вмешательство. То, что атомы обладают магнитными свойствами, — совершенно бесспорно. Это экспериментальный факт. И действительно, спектроскопические исследования, в которых образец помещался в магнитное поле, указывают на то, что каждый электрон ведет себя как элементарный магнитик. Поэтому внесение тела в магнитное поле должно сказываться на конфигурации поля и, наоборот, наличие магнитного поля будет в той или иной степени сказываться на поведении веществ. Под действием

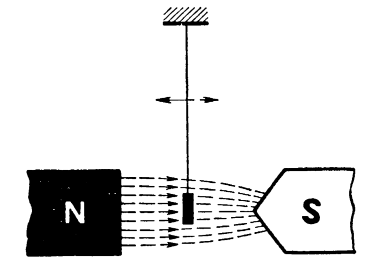


Рис. 19

магнитного поля все тела намагничиваются. Это означает, что каждый элементарный объем тела ведет себя как магнитик, а магнитный момент тела есть сумма магнитных моментов всех элементов объема.

Для оценки интенсивности намагничивания тела обычно рассматривают магнитный момент единицы объема и называют его *намагниченностью*; обозначают — M. Вектор намагниченности:

$$\vec{M} = \frac{N}{V}\vec{p}_m = n\vec{p}_m,$$

где n — число атомов в единице объема. Легко убедиться, что размерность намагниченности совпадает с размерностью магнитного поля:

$$[M] = [Np_m/V] = \text{А} \cdot \text{м}^2/\text{м}^3 = \text{А}/\text{м} = [\text{H}].$$

Отличная от нуля намагниченность M появляется только под воздействием магнитного поля. Во многих случаях, как показывает опыт, индукция магнитного поля $\vec{B}_i$, создаваемого намагниченным веществом, пропорциональна индукции внешнего магнитного поля B_0:

$$\vec{B}_i = \chi\vec{B}_0.$$

Тогда полная индукция в веществе будет равна:

$$\vec{B} = \vec{B}_0 + \vec{B}_i = \vec{B}_0(1 + \chi) = \mu\vec{B}_0,$$

где μ — магнитная проницаемость вещества.

Опыты показывают также, что намагниченность $\vec{M}$ линейно растет с полем, причем оказывается, что

$$\vec{M} = \frac{\chi}{\mu_0}\vec{B}_0 = \frac{\chi\vec{B}}{\mu\mu_0} \text{ или } \vec{M} = \chi\vec{H}.$$

Коэффициент пропорциональности χ называют *магнитной восприимчивостью вещества*. Магнитная восприимчивость связана с магнитной проницаемостью соотношением: $\chi = \mu - 1$. Чем больше эта величина, тем при заданном внешнем поле более намагниченным оказывается вещество.

Надо сказать, что такая пропорциональность между намагниченностью и полем имеет место для диамагнетиков. Для парамагнетиков пропорциональность тоже имеет место, но не в слишком сильных полях и при не очень высоких температурах.

Что касается ферромагнетиков, то здесь дело об-

стоит иначе. Между $\vec{M}$ и $\vec{H}$, т. е. намагниченностью и полем, пропорциональности уже нет. Магнитные моменты этих веществ, созданные приложенным полем, настолько велики, что оказывают существенное воздействие на сами поля. Более того, они вносят главный вклад в наблюдаемое поле.

Почему? К этому вопросу мы подойдем немного позже. Ферромангетизм — достаточно сложное и удивительное явление. А пока обратимся к обычному магнетизму, т. е. к магнетизму «немагнитных» веществ.

Магнетизм «немагнитных» материалов. Этот магнетизм, как мы уже говорили, бывает двух типов. Одни тела притягиваются магнитным полем, другие — отталкиваются. Вернемся к этому факту еще раз и отметим одно очень важное обстоятельство.

Это обстоятельство состоит в следующем. Атомы многих веществ не имеют постоянных магнитных моментов или, точнее, все магнитные моменты уравновешены так, что суммарный магнитный момент атома равен нулю. Если же такой компенсации не происходит, то атом будет обладать постоянным магнитным моментом. Это и определяет особенности в поведении различных веществ в магнитном поле.

Когда во внешнее магнитное поле помещают какое-либо вещество, то все атомы этого вещества оказываются в магнитном поле, которое изменяет движение электронов в атоме так, что появляется добавочный ток, подобный индукционному. Индукционный ток создает *дополнительный магнитный момент,* направленный против внешнего поля. Это и есть *механизм диамагнетизма.* Диамагнетизм представляет собой наиболее естественную форму магнетизма, которая в принципе присуща всем веществам.

Однако каким же образом внутри атома возникают эти дополнительные токи, вызывающие дополнительный магнитный момент в веществе? Чтобы ответить на этот вопрос, вспомним, как ведет себя волчок. Если ось вращающегося волчка не строго вертикальна, то он, помимо вращения вокруг собственной оси, совершает также вращение вместе с осью вокруг вертикали (рис. 20). Это дополнительное движение называется *прецессией.*

Аналогичным образом ведет себя и электрон, который, двигаясь по орбите, образует замкнутый ток и обладает определенным магнитным моментом. В магнитном поле

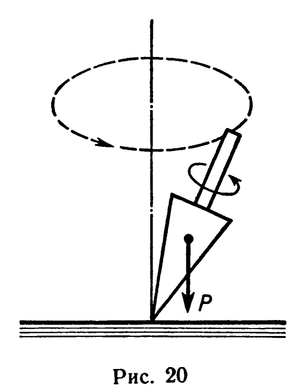


Рис. 20

возникают силы, стремящиеся развернуть плоскость орбиты электрона перпендикулярно полю, что как и в случае волчка приведет к прецессии. Электронная орбита будет прецессировать подобно тому, как ось волчка прецессирует около вертикали.

Прецессия электронной орбиты с некоторой частотой эквивалентна дополнительному движению электрона вокруг магнитного поля. Это и приводит к возникновению замкнутого тока, обладающего магнитным моментом, который ориентирован всегда против поля (рис. 21).

Поскольку диамагнетики намагничиваются против магнитного поля, их намагниченность отрицательна. Поэтому магнитная восприимчивость диамагнетиков также отрицательна ($\chi<0$), а магнитная проницаемость $\mu<1$. Таковы, например, вода, стекло, висмут, серебро, золото, инертные газы и др.

Из наших рассуждений можно заключить, что диамагнитные свойства должны проявляться у всех веществ. Это верно, но слабый диамагнитный эффект у ряда веществ «маскируется» более сильными эффектами.

Существуют такие вещества, атомы которых все же обладают магнитным моментом. Если магнитные моменты частиц, составляющих атом, не скомпенсированы, то результирующий момент атома в магнитном поле подобно магнитной стрелке стремится установиться по полю.

В отсутствие внешнего магнитного поля эти моменты ориентированы хаотично, и вещество оказывается ненамагниченным. При наложении магнитного поля возникают силы, ориентирующие магнитный момент каждого атома. Магнитные моменты в этом случае стараются выстроиться по полю, и наведенный магнетизм стремится усилить магнитное поле. Этот процесс ориентации магнитных моментов атомов во внешнем магнитном поле называется *парамагнитным эффектом*. В отличие от диамагнетиков магнитная восприимчивость парамагнетиков имеет всегда положительные значения ($\chi>0$), а магнитная проницаемость $\mu>1$.

В парамагнетике, вообще говоря, выстраивающие силы относительно малы по сравнению с силами теплового движения, которые стремятся разрушить упорядочивание. Поэтому с понижением температуры магнитная восприимчивость парамагнетиков обычно возрастает. При низких температурах дезориентирующее действие тепловых колебаний (соударений) будет меньше.

Число парамагнитных веществ велико. Парамагнитными являются кислород, платина, щелочные металлы, магний, хром, молибден и др.

Ферромагнетизм. Итак, нам известен строительный материал, из которого сложены магниты. Это атомы и молекулы с магнитными моментами, отличными от нуля.

Это конечно, так. Но в парамагнетиках, помещенных во внешнее магнитное поле, наведенный магнитный момент настолько слаб, что нам не приходится думать о добавочных магнитных полях, созданных этими магнитными моментами. Другое дело магнитные моменты ферромагнитных материалов, созданные приложенным полем. Они очень велики. Настолько, что внутреннее поле в ферромагнетике может превышать во много раз внешнее поле, которое явилось толчком для его наведения. Более того, в постоянных магнитах мы наблюдаем магнитный момент даже в отсутствие внешнего поля, причем он сохраняет свою величину и направление и при наложении внешних полей, если они не слишком велики.

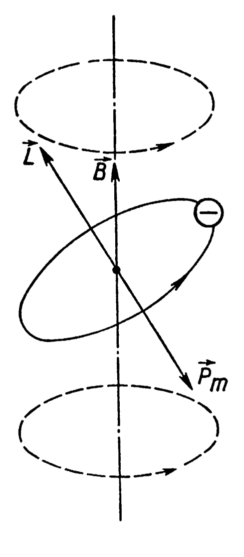


Рис. 21

Если можно было бы заглянуть внутрь кристалла, например железа, и увидеть векторы магнитных моментов со стрелочками, то картина была бы подобна изображенной на рисунке 22.

Не удивительно, что с повышением температуры этот прекрасный порядок нарушается. По мере повышения температуры магнитные моменты начнут раскачиваться. Вначале это колебание происходит в такт и не нарушает порядка. Затем магнитные моменты то одного, то другого атомов переворачиваются и принимают «неправильное» положение. Число таких атомов, «вы-

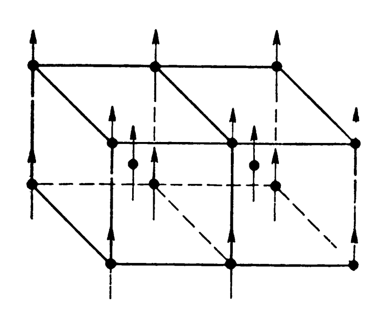


Рис. 22

шедших из строя», все растет, и, наконец, при строго определенной температуре, называемой *температурой Кюри*, происходит полное «плавление» магнитного порядка.

Этот факт легко продемонстрировать. Кусок железа при комнатной температуре притягивается магнитом. Но если его нагреть до температуры 770°C, то он внезапно теряет свои магнитные свойства и не притягивается к магниту. Выше этой температуры железо ведет себя как парамагнетик. Если же оставить его остывать, то в тот момент, когда его температура упадет ниже 770°C, он внезапно снова притянется к магниту. Магнитные свойства железа восстанавливаются.

Обратите внимание на то, что ферромагнетик намагничивается при этом *самопроизвольно — спонтанно*, как принято говорить. Магнитные моменты выстраиваются параллельно друг другу не под воздействием внешнего поля, а благодаря внутренним причинам. Чем ниже температура, тем спонтанный момент больше.

Что же заставляет магнитные моменты железа выстраиваться? Что удерживает их в таком положении?

Конечно, естественно было прежде всего обратиться к магнитным силам, действующим между элементарными магнитиками. Однако, как показывают расчеты, для этого понадобились бы грандиозные магнитные поля. Между магнитными моментами различных атомов железа действуют эффективные силы, которые в тысячи раз сильнее прямого магнитного взаимодействия. Силы эти называются *обменными силами*. Именно они и выстраивают магнитные моменты в ферромагнетиках.

К сожалению, природу обменного взаимодействия трудно объяснить достаточно популярно, так как это взаимодействие не имеет никакого классического аналога. Поэтому не следует понимать слово «обмен» слишком буквально. Такой наглядности, свойственной классической механике, нет. Его возникновение — следствие неразличимости частиц — целиком обязано квантовым свойствам электрона.

Магнитные домены... А что это такое? В нашей попытке понять ферромагнетизм есть одна несогласованность. Мы выяснили, что выше некоторой температуры железо ведет себя как парамагнетик, намагниченность которого пропорциональна магнитному полю. Ниже этой температуры должна возникнуть спонтанная намагниченность — магнитики должны выстроиться в одном направлении.

Но вот что удивительно. При построении кривой намагничивания (зависимости магнитного момента от поля) для железа это как раз и не обнаруживается. Железо становится постоянно намагниченным только после того, как мы его намагнитим. Но ведь только что мы утверждали, что оно должно намагнититься само. Так в чем же дело? Почему любой кусок железа при комнатной температуре не является магнитом?

Оказывается, что если рассматривать достаточно маленький кристаллик железа, то никаких противоречий не возникает. Он и впрямь оказывается полностью намагниченным.

Можно пойти и дальше. Кажущийся намагниченным кусок железа в действительности составлен из большого числа *областей*, имеющих *только одно направление намагниченности*. Такие области называются *магнитными доменами*. В каждом домене магнитные моменты ориентированы одинаково, но направление их ориентации отличается от направлений моментов в соседних доменах (рис. 23).

Получается так, что средняя намагниченность в большом масштабе оказывается равной нулю. Однако в каждом маленьком домене железо все же намагничивает себя, причем до предела. Как следствие такой доменной структуры свойства большого куска ферромагнетика должны быть совершенно отличны от микроскопических, как это и оказывается на самом деле. В целом тело вообще не обладает магнитным моментом (все направления представлены одинаково), поэтому макроскопическое магнитное поле отсутстствует.

Идея о доменной структуре магнитов была высказана еще в начале нашего столетия французским физиком Вейсом и долгое время оста-

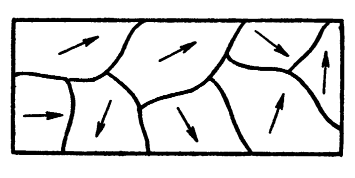


Рис 23

валась не чем иным, как гипотезой. Причем, гипотезой, которую мы сегодня с полным правом можем назвать замечательной: экспериментально доказана ее абсолютная справедливость. Домены можно увидеть даже через микроскоп со слабым увеличением. В атомных масштабах это огромные размеры — в сравнении с атомами они кажутся колоссальными скоплениями.

Может возникнуть вопрос: чем вызвано деление вещества на отдельные домены? Ответ прост: стремлением уменьшить энергию. Всякое тело стремится понизить свою энергию, если есть для этого возможность, конечно. У магнита такая возможность есть — он разбивается на домены.

В самом деле, если бы кусок железа состоял из одного домена, как показано на рисунке 24, *а*, то даже в отсутствие приложенного магнитного поля он должен был бы иметь большой магнитный момент. При этом создалось бы значительное внешнее поле, содержащее в себе большую энергию. Уменьшить эту энергию можно, разбив тело на домены, намагниченные в противоположных направлениях (рис. 24, *б, в*). При этом, разумеется, поле вне железа будет занимать меньший объем и нести в себе меньшие энергии. Наконец, внешнее поле можно свести к нулю, замкнув основные домены треугольными вставками с перпендикулярной намагниченностью, как это показано на рисунке 24, *г*.

Таким образом, «с точки зрения магнитного поля» выгодно разбиение магнетика на возможно большее число областей — доменов. Правда, существование границ (стенок) между доменами, обладающими определенной энергией, невыгодно. С увеличением числа доменов одна

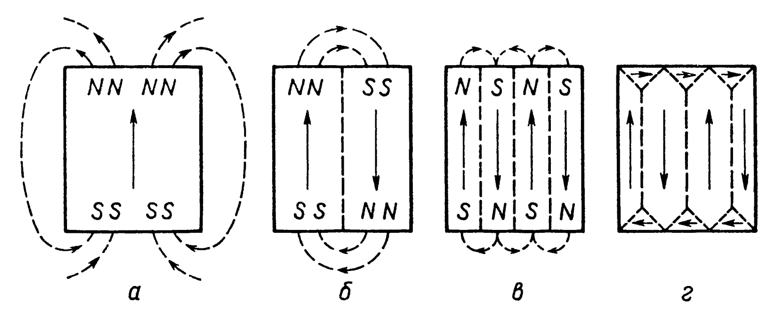


Рис. 24

энергия уменьшается, другая — растет. При некотором промежуточном числе доменов сумма обеих энергий имеет минимум. На такое число доменов и разбивается магнетик.

Вот еще на что здесь нужно обратить внимание. Не следует думать, что домены расположены беспорядочно. Вам, конечно, известно, что в кристаллических телах атомы расположены в строго определенном порядке и составляют так называемую кристаллическую решетку. Так вот, характер кристаллической структуры диктует некоторые направления, в которых магнитным моментам выстраиваться легче всего. Такие направления называются *осями легкого намагничивания.*

Как бы то ни было, в ненамагниченном кристалле царит полный порядок в расположении доменов. При этом доменов с магнитными моментами, направленными в одну сторону, столько же, сколько доменов с магнитными моментами, направленными в противоположную сторону.

А что получится, если мы приложим внешнее магнитное поле?

Домены встречаются с полем. Прежде всего, нас интересует, как это отразится на магнитном поведении ферромагнетика при различных приложенных полях.

Для такого опыта удобно воспользоваться железным кольцом (тором), снабженным двумя обмотками (рис. 25, *а*). В этом случае в железе создается практически однородное магнитное поле. Измеряя напряжение, индуцированное в одной из обмоток, мы можем определить изменение магнитного потока Φ и, следовательно, магнитное поле $\vec{B}$ внутри железа. Ток, протекающий в другой обмотке, определяет напряженность $\vec{H}$, которую мы примем за независимую переменную. Если нам известны $\vec{B}$ и $\vec{H}$, мы всегда можем вычислить M. Типичная кривая намагничивания M—H для ферромагнетика изображена на рисунке 25, *б*.

Как видно из рисунка, при $H=0$ намагниченность M тоже равна нулю. В отсутствие внешнего магнитного поля домены ориентируются так, что суммарный магнитный момент ферромагнетика в целом равен нулю. При наложении магнитного поля ферромагнетик намагничивается, приобретая отличный от нуля магнитный момент. С увеличением поля намагниченность растет сначала медленно

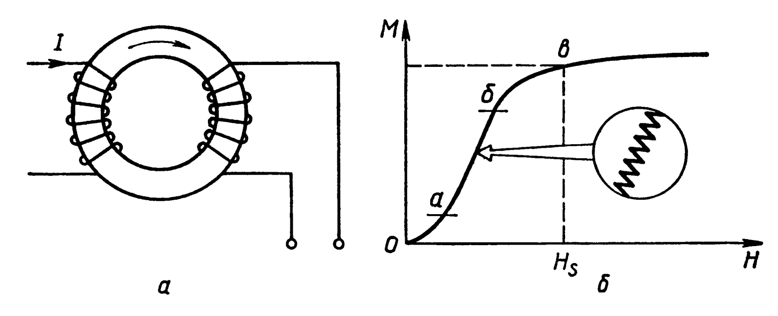


Рис. 25

(в слабых полях), а затем начинается быстрый рост и намагниченность увеличивается в десятки раз. Далее рост намагниченности снова замедляется, и в достаточно сильных полях наступает так называемое *техническое насыщение* (H_s). Намагничивание до технического насыщения называется техническим намагничиванием. При этом числовые характеристики технической кривой намагниченности существенно зависят от размеров и состояния образца, от его обработки при изготовлении. Этим пользуются в технике для создания магнитов с определенными свойствами.

Если после достижения технического намагничивания продолжать увеличивать магнитное поле, то, как показывает опыт, намагниченность хотя и медленно, но все-таки будет возрастать, причем почти линейно с полем. Это изменение намагниченности называют *парапроцессом,* подчеркивая тем самым аналогию с линейной зависимостью от поля намагниченности парамагнетика.

Исходя из представлений о доменной структуре ферромагнетиков, можно объяснить все особенности их намагничивания.

При включении слабого внешнего магнитного поля всегда найдется множество доменов, у которых направление магнитного момента либо совпадает, либо близко к направлению внешнего поля. Эти домены будут иметь меньшую энергию, чем домены с моментами, направленными против поля или как-нибудь иначе. Поэтому энергетически выгодно, если магнитные моменты «неблагоприятно» ориентированных доменов изменят свое направление и присоединятся к тем, энергия которых минимальна. В результате «благоприятно» ориенти-

рованные домены начинают расти. Иными словами, домены с магнитным моментом, направленным по полю (или близко к полю), «поедают» домены, ориентированные менее выгодно (рис. 26). Это приводит к изменению распределения намагниченности и тем самым к перемещению доменной стенки (границы), а в результате — к появлению намагниченности тела. До тех пор пока поле остается очень малым, этот рост обратим; если мы уберем поле, намагниченность снова станет равна нулю. Эта часть кривой намагниченности соответствует на рисунке 25 участку *Оа*.

Дальнейший рост магнитного поля приводит к дальнейшему перемещению границ доменов и к непрерывному возрастанию намагниченности. Наконец, при некотором значении магнитного поля «невыгодные» домены почти исчезают и рост намагниченности замедляется. Таким образом, область, в которой происходит наиболее быстрое изменение намагниченности, соответствует смещению доменных границ (участок *аб* на рис. 25).

Надо сказать, что движение доменной стенки оказывается отнюдь не плавным: стенка движется скачками, то и дело наталкиваясь на своем пути с дефектами кристалла.

Если далее увеличивать поле, то магнитные моменты начнут поворачиваться в направлении к полю и, наконец, совпадут с ним. Здесь процесс намагничивания будет протекать значительно медленнее, чем в случае смещения границ, и рост кривой намагничивания замедляется. Когда в результате вращения все магнитные моменты выстраиваются по полю, намагниченность достигает технического насыщения (участок *бв* на рис. 25). Совокупность этих двух процессов намагничивания — процесса смещения границ и процесса вращения — и составляет процесс технического намагничивания ферромагнетика. Дальнейший рост намагниченности с полем (парапроцесс) — результат ориентации по полю тех

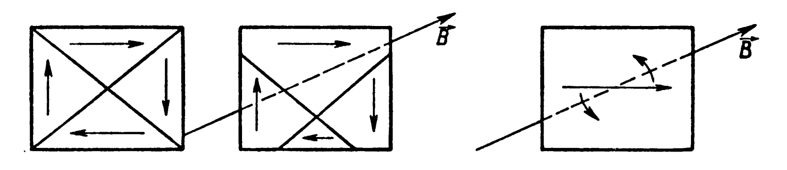


Рис. 26

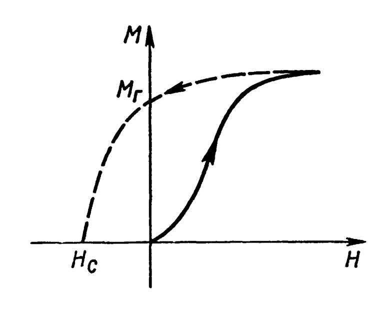


Рис. 27

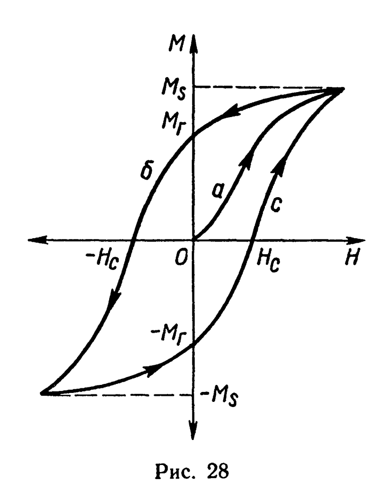


Рис. 28

спиновых магнитных моментов, которые вследствие теплового движения и других причин случайно были направлены против поля. Это увеличение намагниченности весьма мало и практического значения в технике не имеет.

Магнитный гистерезис. Если после достижения насыщения мы будем уменьшать ток в обмотке, уменьшая тем самым магнитное поле, то кривая *M*—*H* не пойдет обратно по тому же пути. Вместо этого мы обнаружим поведение, указанное на рисунке 27. Намагниченность будет отставать в своем уменьшении от поля; намагничивание и размагничивание ферромагнетика описывается разными кривыми. Такая необратимость носит название магнитно гистерезиса.

Даже после выключения тока магнитное поле в ферромагнетике остается. Образец обнаруживает некоторую *остаточную намагниченность* M_r; стенки не так легко возвратятся в положения, обеспечивающие полную компенсацию.

Остаточный магнетизм можно снять. Для этого нужно лишь поменять направление тока в обмотке и создать поле противоположного направления. Поле H_c, при котором остаточная намагниченность обращается в нуль, носит название *коэрцитивного* (задерживающего) поля или *коэрцитивной силы*. Чем больше коэрцитивная сила, тем большее обратное поле требуется для размагничивания, тем труднее размагнитить магнит.

Дальнейшее увеличение поля в обратном направлении ведет опять к насыщению. Образец снова намагничивается. Уменьшая противоположно направленное (отрицательное) поле, мы получим такую же картину, как и

в случае размагничивания от насыщения при положительном поле. Опять появится остаточная намагниченность, равная теперь уже $-M_r$. Чтобы свести эту отрицательную намагниченность к нулю, следует приложить положительное магнитное поле, равное коэрцитивной силе. Увеличивая это поле, мы получим положительную намагниченность, которая будет расти вместе с полем, пока не достигнет насыщения.

Таким образом, при изменении магнитного поля от максимального положительного до максимального отрицательного значения и обратно кривая, характеризующая намагниченность, образует замкнутую петлю, которая называется *петлей гистерезиса* (рис. 28). По такой замкнутой петле (очень близко к ветвям *б* и *с*) мы будем «ходить» при многократном перемагничивании. Однако если поле $\vec{H}$ менять каким-либо иным образом, то возникнут более сложные кривые, которые будут лежать между ветвями предельной петли. Что касается кривой *а* на рисунке 28, то ее можно получить снова, только при условии предварительного размагничивания образца. Поэтому эта кривая носит название *основной* или *первичной кривой.*

Видите, к чему приводит наличие гистерезиса. Невозможно написать функциональное соотношение, связывающее $\vec{B}$ и $\vec{H}$. Намагниченность и индукция ферромагнетика не являются однозначной функцией внешнего поля. Значит, нельзя и заранее предсказать, чему равна магнитная проницаемость μ. Все зависит от предшествующей истории образца, предшествующих событий — было или не было намагничено железо, а если было, то насколько сильно. Короче говоря, гистерезис процесса — это зависимость его состояния в данный момент от предыстории, это *память* о прошлом.

Кусок железа становится магнитом. Сколько бы времени ни прошло, если его не нагревать, не ударять по нему и защищать от сильных магнитных полей, он будет «помнить» ток, приведший его в это состояние. Вся информация, записанная на магнитных элементах, от музыки до сложнейших вычислительных программ, сохраняется благодаря этому замечательному физическому явлению.

МНОГОЛИКИЙ МАГНИТ

Иное железо пригодно для панцирей, иное против выстрелов метательных орудий, иное против мечей и против стали кривых сабель...

Уильям Гильберт

Магнитный камень. Древние греки называли его «геркулесов камень» или адамс, египтяне — кость «Ора», китайцы — «любящий камень»...

Камень, притягивающий, «любящий» железо. Такие камни известны людям уже много сотен лет. А может быть — тысячи. Они представляют собой естественный магнит, встречающийся в природе довольно часто. Это широко распространенный минерал состава: 31% FeO и 69% Fe_2O_3, содержащий 72,4% железа. Называется он также *магнитным железняком* или *магнетитом.*

Естественные магниты вытачивали из магнетита, и они подчас достигали довольно значительных размеров. Магнитный камень оказался поистине волшебным камнем. Он мог даже передавать свою способность другим телам, но только в том случае, если они были сделаны из железа. Натирая куском магнетита в одном направлении брусок железа, можно получить магнит, обладающий всеми теми же свойствами, что и магнит естественный.

Но при изготовлении искусственных магнитов не все сорта железа вели себя одинаково. При натирании одного куска легко достигался желаемый результат, при натирании другого — намагниченность получалась ничтожной. Одни материалы обладали способностью легко намагничиваться и также легко теряли свои магнитные свойства, другие, напротив, оставались сильно намагниченными и после удаления внешнего магнитного поля.

Магниты бывают разными. Для характеристики различных магнитных материалов полезно оперировать ка-

кими-то параметрами. Двумя такими характеристиками являются значения намагниченности M (индукции B) и напряженности H в точках пересечения петли гистерезиса с осями координат. Они называются остаточной намагниченностью (или остаточным магнитным полем) и коэрцитивной силой H_c (поле, при котором остаточная намагниченность обращается в нуль).

В разных ферромагнетиках коэрцитивная сила разная: от десятых долей до тысяч ампер на метр. Материалы с большой коэрцитивной силой называются *магнитожесткими*, а с малой — *магнитомягкими*. В разных областях техники находят себе применение и те и другие.

Магнитомягкие материалы применяются для изготовления сердечников электромагнитов, где важно иметь большие значения максимальной индукции поля и малую коэрцитивную силу. Эти материалы используются в качестве сердечников трансформаторов и машин переменного тока (генераторов, двигателей): благодаря малой коэрцитивной силе они легко перемагничиваются. Такие же требования предъявляются к сердечникам магнитов ускорителей.

Постоянные магниты, напротив, следует изготовлять из магнитожестких материалов. Благодаря большой коэрцитивной силе и относительно большой остаточной намагниченности эти магниты могут длительное время создавать сильные магнитные поля. Такие магниты применяются в магнитоэлектрических измерительных приборах, в электродинамических репродукторах (громкоговорителях) и микрофонах, небольших генераторах, в микроэлектродвигателях и т. д.

Гистерезисные петли двух материалов: магнитомягкого железа (*а*) и высококоэрцитивной (*б*) стали — изображены на рисунке 29.

Размагничивающий фактор. Истинные кривые намагничивания и петли гистерезиса, рассмотренные выше, могут быть получены экспериментально на замкнутых кольцевых сердечниках или очень длинных стержневых образцах.

Однако на практике часто приходится иметь дело с образцами в виде цилиндров, эллипсоидов, полос и т. д., внутреннее поле в которых может существенно отличаться от внешнего. В этом случае внутри разомкнутого образца возникает так называемое *размагничивающее поле,* вызванное действием полюсов, которые образуют-

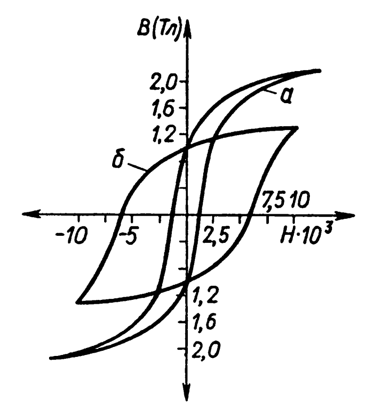


Рис. 29

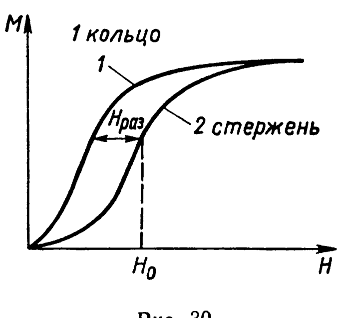


Рис. 30

ся на его концах. В результате кривая намагничивания и петля гистерезиса идут более наклонно, чем в случае кольцевого образца, выполненного из того же материала (рис. 30). Здесь сказывается влияние размагничивающего поля.

Однако существует метод, с помощью которого удается по кривой, снятой относительно внешнего поля, построить кривую намагничивания тела относительно внутреннего поля, т. е. получить истинную кривую намагничивания вещества.

Это оказывается возможным благодаря тому, что с достаточно большой точностью размагничивающее поле можно считать пропорциональным намагниченности образца M: $H_{раз} = N \cdot M$. Величину N называют *размагничивающим фактором* или *коэффициентом размагничивания*. Размагничивающий фактор N является функцией формы образца. Так, для кольцевого сердечника и бесконечно длинного стержня $N = 0$, для шара $N = 4/3\pi$.

Задача, таким образом, сводится к нахождению приема, с помощью которого кривая намагничивания тела (кривая 2 на рис. 31) должна трансформироваться в истинную кривую намагничивания вещества.

Практически это производится следующим образом. Из начала координат, под углом α, удовлетворяющим условию $\mathrm{tg}\alpha = N$, к оси намагниченности проводится так называемая прямая сдвига. При этом расстояние каждой точки на этой прямой до оси ординат будет выражать величину размагничивающего поля. Откладывая эти отрезки влево от кривой намагничивания тела *2* при тех же значениях намагниченности и проведя через концы этих отрезков кривую, очевидно, получим кривую

намагниченности вещества (кривая *1* на рис. 31). Аналогичным образом может быть скорректирована и петля гистерезиса (рис. 32).

Магнитная анизотропия. Ферромагнетики в большинстве своем — тела кристаллические. А такие тела, как известно, обладают определенной внутренней структурой — кристаллической решеткой, которая заметным образом влияет на их свойства. При этом характерной особенностью кристаллов является их *анизотропия.* Это значит, что в кристаллах по различным направлениям свойства различны. В телах же некристаллических все физические свойства по различным направлениям совершенно одинаковы. Такие тела носят название *изотропных* тел.

Поскольку ферромагнетики — тела кристаллические, то возникает вопрос: являются ли магнитные свойства ферромагнетиков изотропными или анизотропными? Иными словами, существует ли анизотропия магнитных свойств, и если да, то каких именно?

Естественно прежде всего выяснить, как зависит спонтанная намагниченность от ее направления в кристалле. Так вот, исследования, проведенные на отдельных кристаллах (их называют монокристаллами), показали, что спонтанная намагниченность по всем направлениям в кристалле совершенно одинакова. Это справедливо для всех ферромагнитных кристаллов. Изотропной оказалась и точка Кюри. Ферромагнитные свойства теряются в ферромагнетике по всем направлениям при одной и той же температуре.

Однако если снимать кривые намагничивания по разным направлениям в ферромагнитных кристаллах (на-

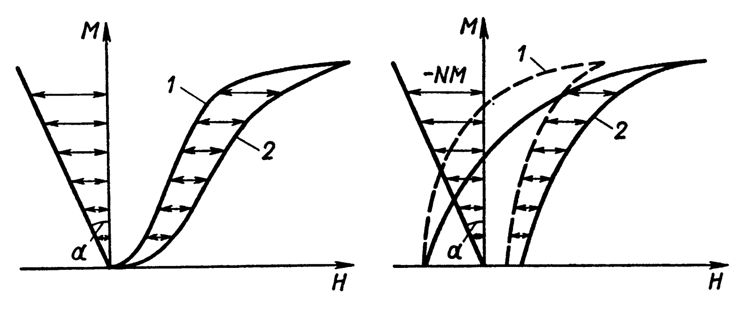


Рис. 31   Рис. 32

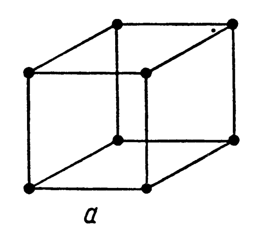
пример, для железа), то окажется, что намагничивание протекает по-разному. Вдоль одних направлений намагничивание идет легко, и насыщение достигается уже при сравнительно низких полях. Намагнитить же кристалл в каком-то ином направлении оказывается значительно труднее.

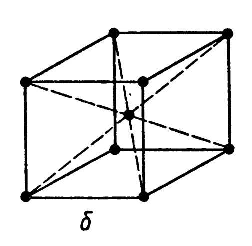
Как же заранее узнать, какими будут эти избранные направления? Здесь все дело в геометрии самого кристалла. Расположение атомов в кристалле — кристаллическая решетка — может принимать множество геометрических форм. Простейшие из них — кубические решетки. Именно в этой системе кристаллизуются многие практически важные магнитные материалы.

Не вдаваясь в подробности, отметим типичные модификации решеток простейшей кубической системы. Будем представлять себе эту решетку составленной из шариков, размещенных в вершинах куба. Эти шарики можно разместить более плотно, если в центр каждой элементарной ячейки — куба — поместить по одному дополнительному шарику (рис. 33, *а, б*). Подобная решетка называется *объемноцентрированной*. В таком виде кристаллизуется, например, железо. Поместив по дополнительному шарику в центрах граней элементарной ячейки, мы получим так называемую *гранецентрированную* кубическую решетку (рис. 33, *в*), которая характерна, в частности, для такого ферромагнетика, как никель.

Так вот, для железа, имеющего решетку типа объемноцентрированного куба, направление *легкого намагничивания* совпадает с направлением *ребра куба,* диагональ грани является направлением среднего намагничивания, а пространственная диагональ куба — направлением наиболее трудного намагничивания (рис. 34). В никеле порядок обратный.

Как видите, намагниченность «чувствует» кристалли-


а


б

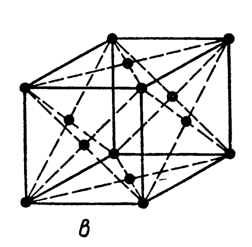

в

Рис. 33

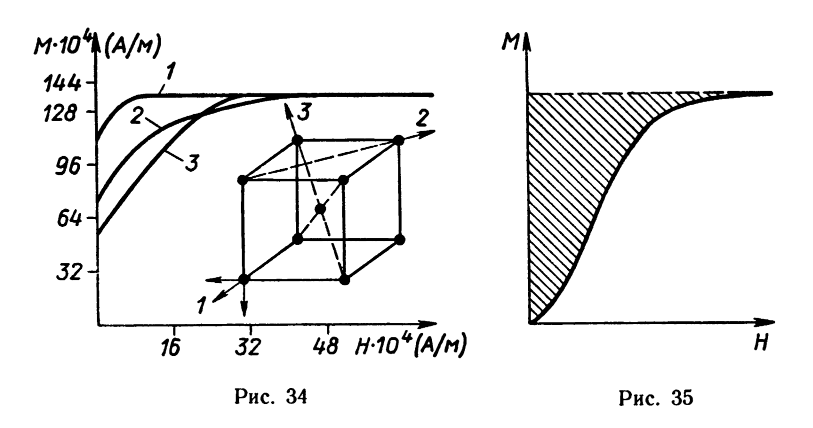


Рис. 34 Рис. 35

ческую решетку. Благодаря магнитным силам, действующим внутри кристаллической решетки, при наложении внешнего магнитного поля изменение ориентации доменов по одним кристаллическим направлениям достигается легче, чем по другим. Это и определяет сущность *магнитной анизотропии.*

Магнитную анизотропию удобнее всего характеризовать работой намагничивания. В самом деле, при намагничивании ферромагнетика расходуется некоторая энергия. Численно эта энергия определяется площадью, ограниченной осью намагниченности и кривой намагничивания, как показано на рисунке 35 (эта площадь заштрихована).

Легко видеть, что наибольшей магнитной энергией обладает кристалл, намагниченный вдоль трудного направления, наименьшей — в направлении легкого намагничивания. Разность между этими энергиями, отнесенная к единице объема, представляет собой важную характеристику ферромагнетика и называется *константой магнитной анизотропии.*

С помощью железа. Посмотрите на периодическую систему элементов Менделеева. В ее правой части, в восьмой колонке вы увидите три близких металла — железо, кобальт и никель. Все они ферромагнетики. Но наиболее сильными магнитными свойствами обладает железо.

Железо является основным компонентом почти всех современных магнитных материалов, и его качество во многом определяет их свойства.

Чистое железо является мягким в магнитном отношении материалом. Его намагниченность легко изменяется. Даже очень малое приложенное магнитное поле позволяет получить большие значения намагниченности и, следовательно, высокие значения магнитной индукции (см. рис. 29). Такие материалы хороши в тех случаях, когда требуется высокая магнитная проницаемость, малая коэрцитивная сила и незначительные потери на перемагничивание. В частности, чистое железо идет на изготовление сердечников электромагнитов. Но для изготовления трансформаторов и электродвигателей оно малопригодно, так как обладает незначительным сопротивлением, что приводит к высоким потерям энергии на вихревые токи Фуко.

В этих случаях используются железокремнистые сплавы. Железокремнистые сплавы являются наиболее дешевым и распространенным мягким магнитным материалом. Добавка кремния (до 5%) заметно повышает электросопротивление чистого железа и одновременно увеличивает его магнитную проницаемость. При этом намагниченность насыщения остается практически неизменной, а коэрцитивная сила заметно уменьшается.

Наряду с железокремнистыми сплавами широко применяются в настоящее время и сплавы железа с никелем. Здесь мы встречаемся с любопытным фактом. Оказывается, можно найти такую их пропорцию, когда сплав не будет иметь никакого предпочтительного направления намагничивания, т. е. направления вдоль ребра куба и его пространственной диагонали будут эквивалентны. Это достигается при содержании никеля между 70—80%. При этом получаются очень мягкие магнитные материалы — сплавы, которые легко намагничиваются. Они называются *пермаллоями.* Пермаллои обладают исключительно высокой магнитной проницаемостью и малой коэрцитивной силой. Более того, если пермаллой нагреть и затем охладить его в магнитном поле (термомагнитная обработка), то проницаемость возрастает во много раз. Этим качеством и обусловлено большое техническое значение пермаллоев. Они используются в радиопромышленности, автоматике, в специальных высокочувствительных приборах, но совершенно не годятся для постоянных магнитов.

Если нужно сделать постоянный магнит, то требуется найти материал, имеющий большую остаточную намагни-

ченность и необычайно широкую петлю гистерезиса. Причем спад кривой должен быть крутым, чтобы малые случайные внешние поля не влияли на остаточное поле. Для таких жестких в магнитом отношении материалов границы доменов должны быть «заморожены» на месте как можно крепче.

Существуют специальные сплавы железа, которые созданы для получения требуемых магнитных свойств. Одним из таких материалов является замечательный сплав Альнико на базе алюминия, никеля, кобальта. Эти сплавы после соответствующей термической (и термомагнитной) обработки обладают остаточной индукцией до 1 Тл и коэрцитивной силой порядка 10^4 А/м.

Еще более сильные магниты изготовляют из сплава Магнико, в состав которого входят, кроме железа, кобальт, никель и некоторые другие добавки. Созданные на основе этих сплавов магниты могут поднимать груз, более чем в тысячу раз превышающий их собственный вес. Остаточная индукция в таких материалах после термомагнитной обработки достигает 1,5 Тл, а коэрцитивная сила — сотен тысяч ампер на метр.

Очень важным достижением в проблеме получения магнитожестких материалов явилась разработка так называемых *порошковых магнитов,* спрессованных из мелких частиц ферромагнетиков. Дело в том, что свойства очень мелких частиц значительно отличаются от свойств того же вещества в большом объеме. Если уменьшить размеры ферромагнетика, раздробив его в мелкий порошок, то частицы окажутся неспособными поддержать междоменную границу и превратятся в самостоятельные домены.

Если магнитный материал спрессован из таких однодоменных частиц, то намагничивания путем смещения границ быть не может. Такая структура после соответствующей механической и термической обработки будет обладать исключительно высокими значениями остаточной индукции и коэрцитивной силы. Даже такой мягкий в магнитном отношении материал, как железо, после измельчения его до однодоменных размеров и прессовки представляет собой магнитожесткий материал. В современной технике эти материалы используются для изготовления постоянных магнитов, область применения которых весьма обширна.

Необыкновенные магниты. До сих пор речь шла о

ферромагнитных материалах и сплавах. О том, что для таких материалов характерно параллельное расположение магнитных моментов, мы уже говорили. Однако существуют вещества, для которых энергетически выгодной является антипараллельная ориентация магнитных моментов.

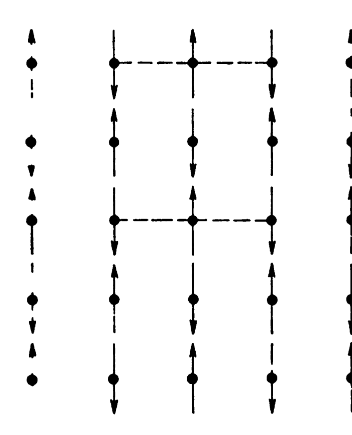


Рис. 36

Возьмем, к примеру, такой элемент, как хром. В периодической системе элементов Менделеева он стоит перед ферромагнитными элементами — железом, никелем и кобальтом. Но хром не ферромагнетик. Почему?

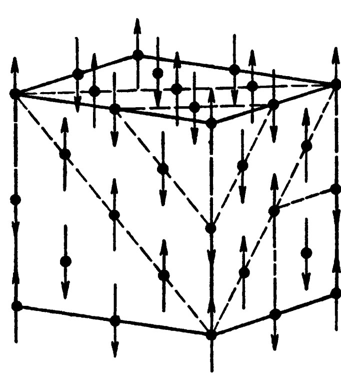


Рис. 37

В решетке хрома, как оказалось, магнитные моменты атомов направлены так, как показано на рисунке 36. Как видите, их расположение упорядоченно, но не так, как в ферромагнетике. Каждый магнитный момент окружен антипараллельными магнитными моментами. Хотя хром все же магнетик, но внешнего магнитного эффекта не дает. Спонтанная намагниченность не возникает, так как магнитные моменты атомов будут взаимно скомпенсированы. Такой материал называется *антиферромагнетиком*, а само явление *антиферромагнетизмом*. Кристаллическая структура реального антиферромагнетика (оксида марганца MnO) показана на рисунке 37.

У антиферромагнетиков существует температура, аналогичная температуре Кюри у ферромагнетиков, выше которой нарушается строгая антипараллельность магнитных моментов. Упорядочение исчезает, и вещество превращается в обычный парамагнетик. Эта температура называется *точкой Нееля*, по имени французского ученого, разработавшего теорию антиферромагнетиков.

Конфигурацию с чередующимися магнитными момен-

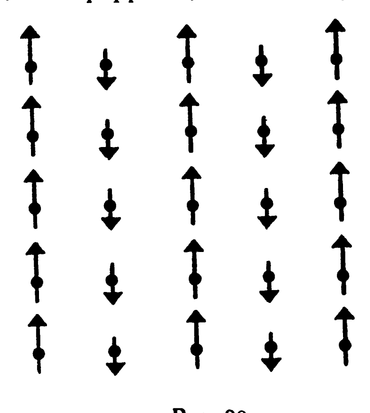
тами, показанную на рисунке 37, можно рассматривать как две ферромагнитные решетки, вставленные друг в друга. Их обычно называют *подрешетками.* В антиферромагнетиках магнитные моменты подрешеток оказываются взаимно скомпенсированными. Однако в ряде случаев эта компенсация может оказаться неполной, например вследствие неодинакового числа или разной природы атомов, образующих подрешетки. Такой случай схематически изображен на рисунке 38.

Отсутствие полной компенсации магнитных моментов подрешеток приводит к тому, что в антиферромагнетике возникает некоторая результирующая, отличная от нуля, спонтанная намагниченность. Такие материалы как бы объединяют в себе свойства ферромагнетиков и антиферромагнетиков. Их называют *ферримагнетиками* или *ферритами.*

Ферриты внешне ведут себя подобно ферромагнетикам. Конечно, у них по очевидным причинам намагниченность насыщения и магнитная индукция не столь велики, как у железа. Но они обладают очень важным преимуществом — низкой проводимостью.

Ферриты. Именно такое своеобразное сочетание магнитных свойств, близких к свойствам металлических ферромагнетиков, с электрическими полупроводниковыми свойствами делает ферриты чрезвычайно интересными объектами как с точки зрения строения вещества, так и с точки зрения возможностей их практического применения.

Создание таких материалов, как ферриты, позволило, например, разрешить казалось бы совершенно непреодолимую трудность, возникшую в технике высоких и сверхвысоких частот в вопросе использования магнитных материалов. Дело в том, что в большинстве радиотехнических устройств, в которых применяются магнитные поля, для усиления этих полей в катушки с током помещают сердечники (магнитопроводы) из ферромагнитных материалов. При питании катушек постоянным током


Рис. 38

можно использовать сердечники, изготовленные из сплошного ферромагнетика, например железа, пермаллоя и др. При питании же переменным током, особенно повышенной частоты, катушки с такими сердечниками уже непригодны, так как при перемагничивании сердечника возникают сильные вихревые токи, которые не только увеличивают потери энергии и снижают КПД устройств, но и могут настолько нагреть сердечник, что устройство перестает работать или даже выходит из строя.

Идеальными для сердечников могут быть материалы, обладающие высокой магнитной проницаемостью, малой коэрцитивной силой, высоким значением магнитного насыщения и большим электрическим сопротивлением, т. е. материалы, которые не относятся к классу проводящих. Такими свойствами, в частности, обладают ферриты, в которых сочетаются свойства ферромагнетиков и электрические свойства полупроводников.

В общем виде простые ферриты представляют собой соединения оксида железа с оксидами других металлов. Выражаются они химической формулой $MeOFe_2O_3$ или $MeFe_2O_4$, где Me — двухвалентный металл, например Mg, Ni, Co, Mn и т. д. Это так называемые однокомпонентные ферриты. При этом название феррита определяется характеризующим металлом. Так, когда им является никель Ni, то феррит называется никелевым, когда марганец Mn — марганцевым и т. д.

Изготовляют ферриты прессованием и последующим спеканием соответствующих оксидов. Получается своего рода керамика, из которой сравнительно легко формовать сердечники любой нужной конфигурации.

Большой интерес представляют так называемые смешанные ферриты, в состав которых входят оксиды нескольких металлов, например MnO и MgO, NiO и ZnO и т. д. Изменяя природу этих оксидов и их соотношения, можно в широких пределах изменять магнитные и другие свойства ферритов. Можно получать магнитомягкие и магнитожесткие ферриты, ферриты с прямоугольной петлей гистерезиса и т. д.

Магнитомягкие ферриты, обладающие высокими значениями магнитной проницаемости, индукции насыщения, остаточной индукции и низкой коэрцитивной силой, используются для изготовления сердечников катушек, трансформаторов, магнитных антенн и различного рода высокочастотных магнитопроводов. К таким ферритам

относятся марганец-цинковые, никель-цинковые, литий-цинковые и др.

Магнитожесткие (железо-кобальтовые, бариевые и др.) ферриты, имеющие большую коэрцитивную силу и остаточную намагниченность, применяются для изготовления постоянных магнитов. Высокое электрическое сопротивление таких ферритов позволяет применять их в сверхвысокочастотной технике для подмагничивающих систем.

Особую группу составляют ферриты с прямоугольной петлей гистерезиса. Эти материалы обладают чудесным качеством. Остаточная индукция в них мало отличается от индукции насыщения. При изменении направления намагничивающего поля на противоположное намагниченность сохраняется почти неизменной до тех пор, пока не будет достигнут изгиб петли гистерезиса (рис. 39). Незначительное дальнейшее увеличение поля приводит к быстрому перемагничиванию. Намагниченность скачкообразно меняет знак и молниеносно переходит из одного устойчивого состояния в другое.

О том, как используется на практике это замечательное свойство ферритов с прямоугольной петлей гистерезиса, мы расскажем в главе «Магнит запоминает».

Магнитные пленки. Любая область науки и техники в ходе развития переживает ряд кризисов, когда основательно пересматриваются прежние методы и идеи. Результатом кризиса, пережитого электроникой, было рождение микроэлектроники и, в частности, магнитной микроэлектроники, основу которой составляют тонкие магнитные пленки.

Тонкие магнитные пленки — это слои ферромагнитных веществ, нанесенные на немагнитную подложку.

Пленка наносится обычно путем испарения исходного магнитного сплава в вакууме или методами электролитического и химического осаждения. В последние годы особенно интенсивно развивается метод катодного распыления.

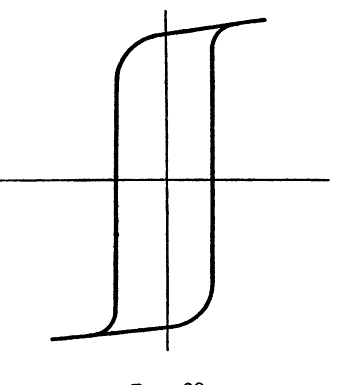


Рис. 39

В этом случае поверхность твердого тела — мишени — бомбардируют отдельными атомами, ионами или молекулами. Бомбардируемая мишень распыляется, и часть ее атомов попадает на подложку. Там они конденсируются и образуют пленку.

Толщина пленок, получаемых на практике, составляет тысячные, десятитысячные доли миллиметра и меньше. В таких пленках магнитные домены охватывают всю толщу слоя, и направление их спонтанной намагниченности всегда параллельно поверхности слоя. Такие однодоменные по толщине ферромагнитные слои и принято называть *тонкими магнитными пленками.*

Магнитные пленки обладают рядом замечательных качеств. В них своеобразно сочетаются макро- и микроскопические свойства вещества. И это естественно. Ведь в двух измерениях пленка представляет собой обычное макроскопическое тело, тогда как в третьем измерении она является микроскопическим образованием. В такой, по сути дела, двумерной системе процессы намагничивания и перемагничивания происходят несколько иначе, чем в массивных ферромагнитных кристаллах. В частности, магнитные моменты по всей пленке могут одновременно поворачиваться по полю. Такой процесс вращения физики называют *однородным* или *когерентным.*

Однородное вращение происходит за предельно короткие промежутки времени и является, по-видимому, самым быстротекущим процессом перемагничивания. Пленка очень быстро переходит из одного состояния в другое.

А что значит «очень быстро»? Ферритовое колечко, например, перемагничивается всего за миллионные доли секунды. Разве это не быстро? Но магнитные пленки перемагничиваются в сотни и более раз быстрее — за миллиардные доли секунды. Это ценное свойство, особенно для таких отраслей электроники, как автоматика и вычислительная техника.

Кроме того, магнитные тонкие пленки обладают ярко выраженной магнитной анизотропией. При определенном режиме осаждения пленки, например в присутствии магнитного поля, образуется единственное направление легкого намагничивания. Вдоль этого направления петля гистерезиса оказывается прямоугольной.

Замечательным свойством магнитных пленок является также их прозрачность для света, позволяющая не-

посредственно наблюдать доменную структуру. На рисунке 40 показано, как осуществляется такое наблюдение с использованием поляризованного света.

Свет, как известно, имеет волновую природу, причем световые волны — это волны поперечные, т. е. колебания в световой волне направлены перпендикулярно линии распространения светового луча. В естественном свете эти поперечные колебания совершаются перпендикулярно направлению распространения луча в самых разнообразных плоскостях. Но если на пути светового луча поставить особый прибор — *поляризатор,* то световые волны после него будут колебаться в строго определенной плоскости. Такая световая волна называется *поляризованной.*

Если теперь на пути поляризованного света поставить еще один поляризующий прибор — *анализатор*, то свет через него пройдет только в том случае, если анализатор и поляризатор расположены одинаково. В противном случае свет пройдет лишь частично. Если же направление колебаний поляризованного света перпендикулярно к направлению колебаний, пропускаемых анализатором, то свет полностью будет задержан. Это имеет место при скрещенных поляризаторе и анализаторе, когда они расположены под прямым углом относительно друг друга.

Так вот, оказывается, что при прохождении поляризованного света через намагниченное вещество возникает вращение плоскости поляризации. Это явление, получившее название *магнитооптического эффекта Фарадея*, можно использовать для исследования доменной структуры прозрачных магнитных пленок.

Дело в том, что направление вращения плоскости

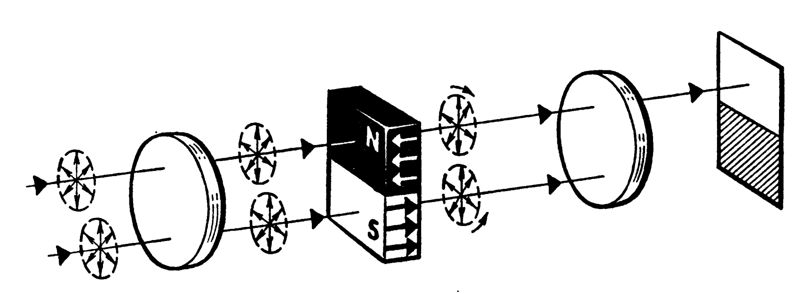


Рис. 40

поляризации зависит от направления намагниченности в домене. Одни домены вращают плоскость поляризации света в одном направлении, а другие — в противоположном, в зависимости от направления их намагниченности. При этом угол вращения зависит от составляющей намагниченности вдоль направления распространения света. Анализатор (см. рис. 40) можно располагать так, чтобы «гасить» свет от какой-нибудь системы доменов; эти домены будут выглядеть темными, в то время как другая система будет светлой. Стоит повернуть анализатор — и картина освещенности изменится. Таким образом, доменную структуру мы будем наблюдать в виде четких темных и светлых полос доменов противоположной намагниченности.

В настоящее время исследованию физических свойств тонких магнитных пленок уделяется много внимания, особенно в связи с поисками новых элементов памяти электронных машин. Ведь, помимо высокого быстродействия и прямоугольности петли гистерезиса, элементы из тонких ферромагнитных пленок обладают и рядом других преимуществ. Они потребляют гораздо меньше энергии и служат дольше. А если учесть к тому же их высокую надежность в работе, малые размеры и, наконец, малую стоимость, то станет вполне очевидно, что с появлением пленочных элементов современная электроника приобрела много новых возможностей.

Секрет «магнитных пузырьков». Чрезвычайно интересной особенностью тонких магнитных слоев является возможность создания в них небольших однородно намагниченных цилиндрических областей — доменов. Такие домены кто-то метко назвал *магнитными пузырьками.*

Действительно, при рассмотрении в микроскоп эти цилиндрические домены удивительно напоминают мыльные пузырьки. Достаточно поднести к объективу небольшой магнит, и мы увидим, как в этом неоднородном поле домены медленно «плывут» в область более слабого поля. При движении они не сближаются друг с другом, и это тоже напоминает характерное поведение выдуваемых мыльных пузырьков, которые обычно электрически заряжены и поэтому избегают контакта друг с другом.

Пузырьки — это, конечно, аналогия. Но аналогия довольно глубокая. Впрочем, показ всегда нагляднее,

чем рассказ. Посмотрите на рисунок 41, такую картину можно наблюдать с помощью поляризованного света в тонких слоях некоторых магнитных материалов с единственной осью легкого намагничивания перпендикулярной плоскости пленки.

Извилистые полосы — это домены. В отсутствие внешнего магнитного поля площади светлых и темных полос — доменов с противоположными направлениями намагниченности — равны и результирующая намагниченность отсутствует. Пленка размагничена.

Крошечные, в тысячные доли миллиметра, цилиндрики, проходящие сквозь всю пленку, — это тоже домены. Поэтому их так и называют: *цилиндрические магнитные домены*, или, короче, ЦМД. Как же возникают ЦМД?

Сначала вспомним, что происходит с доменами при наложении внешнего магнитного поля. Те из них, которые обладают благоприятно ориентированным моментом и «смотрят» в нужном направлении, начинают расти за счет других. Значит, при наложении внешнего магнитного поля, направленного перпендикулярно плоскости пленки, размеры доменов с намагниченностью вдоль поля будут расти за счет уменьшения размеров доменов с противоположной намагниченностью. Это поле стягивает извилистые

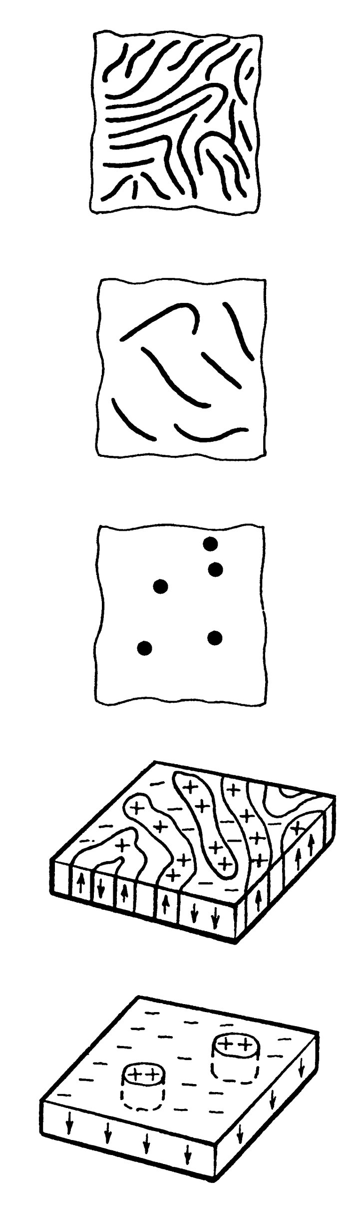


Рис. 41

полосы, образуя своеобразные «островки». В конце концов, когда поле достигнет критического значения, «островки» превращаются в устойчивые цилиндрические домены с намагниченностью, направленной «вверх», которые окружены областью с намагниченностью, направленной «вниз», или наоборот.

Можно пойти и дальше — увеличить поле. Пузырьки начнут сжиматься и, наконец, став очень маленькими, исчезнут совсем, оставив пленку однородно намагниченной вдоль поля. Таким образом, ЦМД оказываются устойчивыми лишь в ограниченном диапазоне полей. Вне этого диапазона они либо растягиваются, образуя извилистые полосы, либо сжимаются и исчезают.

Но вот что интересно. Если теперь уменьшить внешнее поле, сделав его меньше поля уничтожения, то пузырьки вновь не появятся. Для этого оказывается необходимым образование так называемых зародышей, а они могут возникнуть лишь при приложении к пленке обратного поля выше поля уничтожения. Но тогда пленка просто перемагнитится в обратном направлении.

А что, если поле приложить не ко всей пленке, а локально? Например, пропустив импульс тока через небольшую петельку, расположенную над пленкой, как показано на рисунке 42. Магнитное поле, создаваемое током, разорвет полосу, и под петелькой образуется пузырек, который останется и после выключения тока.

Если к пленке с магнитным пузырьком приложить еще продольное магнитное поле, возрастающее от одного края к другому, то пузырек будет перемещаться. ЦМД, как оказалось, обладают уникальным комплексом свойств: их можно контролируемо создавать, перемещать, уничтожать, осуществляя таким образом ввод и вывод информации. Это сразу же наводит на мысль о возможных применениях пленок с ЦМД в электронных машинах и автоматах. Незначительное потребление энергии ЦМД-устройствами и их скоростные возможности очень привлекательны с точки зрения создания систем хранения и обработки информации.

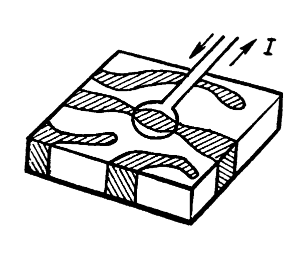


Рис. 42

Нужно сказать, что исследование разнообразных физических особенностей ЦМД и их взаимодействий с теми или иными внешними воздействиями открыло по существу новую область магнитных явлений. Многое здесь еще остается неясным. В использовании замечательных возможностей ЦМД делаются только первые шаги, по многим важным направлениям производится лишь первая разведка. Однако уже то, что нам известно сейчас, достаточно для утверждения, что дальнейшие перспективы этого направления прикладного магнетизма интересны и весьма многообещающи.

«...и о большом магните — Земле». Магнитное поле Земли издавна привлекало к себе внимание людей. Обнаруживается оно крайне просто. Подвешенный на нити намагниченный стержень всегда указывает определенное направление. Именно так и действует стрелка компаса, известная людям с древнейших времен. Многие столетия она служила им в качестве главного навигационного прибора, хотя при этом никто по-настоящему не понимал принцип его действия. Даже самым смелым из мыслителей древности и средневековья не приходила в голову дерзкая мысль о магнетизме Земли. Только в начале XVII столетия благодаря усилиям замечательного английского исследователя Гильберта наука дала более или менее четкий ответ на вопрос: «Почему один конец магнитной стрелки всегда указывает на север?»

«О магните, магнитных телах и о большом магните — Земле» — так озаглавил Гильберт свой главный труд, в котором изложил результаты собственных очень важных опытов. Выточив из куска магнетита шар — террелу (маленькую Землю), Гильберт исследовал ориентацию магнитной стрелки, подвешенной над разными его частями, и пришел к выводу, что Земля представляет собой гигантский магнит, ось которого направлена вдоль земной оси.

Посмотрите на рисунок 43. Так представляется магнитное поле Земли. Вы, конечно, заметили, что магнитные и географические полюсы Земли не совпадают: магнитная стрелка направлена не совсем точно с севера на юг. Существует так называемое *магнитное склонение* — угол между направлением магнитного и географического меридианов, и величина его меняется от места положения на земном шаре. Это изменение магнитного

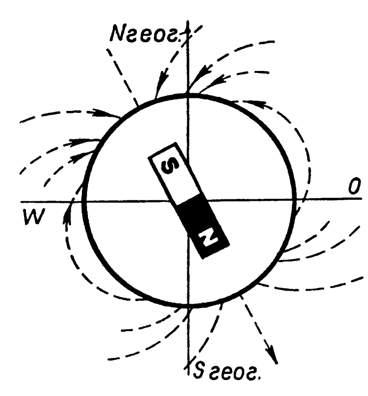


Рис. 43

склонения обнаружил еще Колумб в 1492 г. Кроме того, линии индукции земного магнитного поля, вообще говоря, не параллельны поверхности Земли, поэтому магнитная стрелка не лежит в плоскости горизонта данного места, а составляет с этой плоскостью некоторый угол. Этот угол называется *магнитным наклонением.*

Магнитное склонение и магнитное наклонение полностью определяют направление земного магнитного поля в данном месте. Что же касается величины этого поля, то исследования показали, что магнитный «диполь», находящийся в глубине Земли, создает неоднородное поле, которое на магнитных полюсах достигает значения $0{,}6 \cdot 10^{-4}$ Тл, а на экваторе $0{,}3 \cdot 10^{-4}$ Тл.

Но откуда взялось это магнитное поле и что за магнит, который находится внутри Земли? Вот этого-то на самом деле никто точно не знает. Земной магнетизм относится к еще не понятым до конца явлениям природы.

Надо сказать, что магнитное поле Земли испытывает изменения. Периодические изменения магнитного поля невелики и происходят довольно плавно. Одни из них протекают очень медленно, в течение веков (вековые изменения), а другие — всего в течение суток. Однако время от времени случается, что магнитное поле Земли сразу, в течение нескольких часов, меняется очень сильно. Происходит это из-за потоков заряженных частиц, прилетающих на Землю извне.

Резкие изменения магнитного поля наблюдаются и во многих местах земной поверхности. Такие области называются областями магнитной аномалии. Причиной магнитной аномалии в большинстве случаев является наличие в недрах Земли больших масс магнитных руд. Поэтому изучение магнитной аномалии может дать ценные сведения о наличии и расположении этих залежей. Исследуя магнитное поле над рудным телом, можно определить с достаточной степенью точности объем руд-

ного тела и глубину его залегания. Магнитная разведка является в настоящее время одним из очень важных и широко применяемых геофизических методов разведки полезных ископаемых.

«Ископаемый магнетизм». Разговор об изменениях магнитного поля Земли заставил нас затронуть тему, которая сама по себе представляет большой интерес. Речь идет о *палеомагнетизме* — новой науке, возникшей на стыке физики и геологии.

Палеомагнетизм в буквальном смысле слова означает «древний магнетизм». Наука о палеомагнетизме стремится установить, каково было магнитное поле Земли в прошедшие геологические эпохи, в том числе и отдаленные от нас сотнями миллионов лет. Эти исследования опираются в основном на изучение остаточной намагниченности горных пород, которая возникла в них в момент их формирования.

Представьте себе кирпич или черепок глиняной посуды античной эпохи. Всякая глина содержит мелкие частицы магнетита, которые являются в ней как бы крохотными магнетиками. Но в обычной глине они расположены беспорядочно, поэтому необожженный кирпич магнитных свойств не имеет. Когда же он подвергается обжигу при температуре 500—700 °С, частицы приобретают большую подвижность и каждая из них, подобно стрелке компаса, поворачивается по направлению магнитного поля Земли. Кирпич становится намагниченным, и, когда он остывает, вектор намагниченности «замораживается» и в таком виде остается до наших дней.

Те же самые явления имеют место и при образовании горных пород. Многие горные породы, образовавшиеся из раскаленной магмы (жерло вулкана — та же самая печь для обжига), тоже несут в себе отпечаток того магнитного поля Земли, которое существовало в эпоху их образования. Таким образом, по направлению вектора естественной остаточной намагниченности можно восстановить геомагнитную карту прошедших

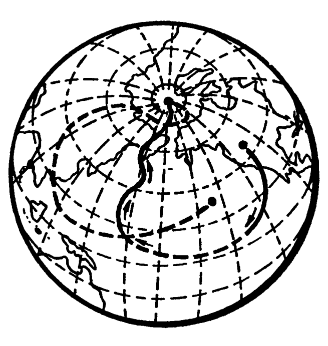


Рис. 44

эпох и определить местонахождение древнего геомагнитного полюса.

Где же был магнитный полюс в давние времена?

На рисунке 44 показаны изменения положения полюса, вычисленные по американским (жирная штриховая линия) и по европейским образцам горных пород. Удивительно, но эти линии не совпадают. Именно это расхождение путей движения магнитного полюса привело ученых к мысли о том, что на протяжении истории существования Земли материки смещались относительно друг друга. Так, Северный магнитный полюс, по данным европейских образцов, 700 млн. лет назад находился у берегов Калифорнии. Затем он двигался на юг, потом на запад и в течение примерно 200—300 млн. лет прошел поперек Тихого океана и оказался у берегов Японии и только после этого повернул на север.

Так вот, если, руководствуясь этими данными, заставить нынешние материки пройти предполагаемый путь их дрейфа в обратном направлении, то дуги движения магнитного полюса сольются в одну, а материки сойдутся в один суперконтинент. Эта неведомая земля по имени Гондвана волнует не одно поколение ученых.

МАГНИТ ЗАПОМИНАЕТ

Послушайте, что смертным создал я:
Число им изобрел
И буквы научил соединять.
Им память дал — мать муз, всего
причину

Эсхил, «Прометей»

Из простого рождается сложное. Современная техника создала немало новых приборов и устройств, которые непосредственно служат людям. Сегодня в этом списке появилась еще одна строка — «Электронные вычислительные машины»...

ЭВМ... Мы уже привыкаем к этим удивительным, «умным» машинам, умеющим решать сложные логические и математические задачи. Привыкаем, как привыкали когда-то к телефону, к радио, к телевизору... Утихли некогда бурные дискуссии на тему «может ли машина мыслить» или «может ли машина быть умнее человека». Спорящие стороны пришли, кажется, к единому мнению и отдали человеческое — способность творчески мыслить — человеку, а машинное — способность накапливать в элементах электронного мозга огромное богатство данных и быстро оперировать ими — машине.

Долог и сложен был путь развития вычислительных средств. Камешки, палочки, ракушки на веревочке, наконец, пальцы рук — вот первые примитивные орудия счета. Очень долго они служили людям. Их потомки служат нам и сейчас. Только стали они гораздо «умнее». Электроника снабдила их элементами, способными записывать и запоминать, научила вычислять, обобщать и делать выводы. Они стали как бы «мыслить самостоятельно».

«Мышление» машины, конечно, имеет свою, особую форму, но считает она так же, как и наш предок, — на пальцах. Только вместо пальцев она использует электрические сигналы, импульсы, которые запоминают-

ся в ее памяти. Разница лишь в числе пальцев, т. е. в объеме памяти и в скорости счета.

Гигантская память и гигантская скорость — вот что такое ЭВМ. Производительность, мощность, универсальность такой машины зависят от того, как быстро она запоминает, как много сведений она может хранить в глубинах своей памяти и как быстро она может извлекать из этих глубин необходимую в данный момент информацию.

Вот почему ученые и инженеры, создающие вычислительные машины, настойчиво ищут все новые и новые виды машинной памяти.

По следам природы. Казалось бы, почему инженерам не обратиться за советом к специалистам, изучающим механизмы памяти человеческого мозга? Ведь мозг человека так совершенен, так компактен. Почему бы инженерам не скопировать устройство «живой памяти»?

Возможно, наступит такое время, когда устройство такого «живого прибора», как мозг, будет изучено досконально и инженеру останется лишь создать его копию, чтобы использовать ее для технических нужд. Но пока такие вопросы решаются иначе.

Машинная «память» была создана инженерами. А инженеры, создававшие первые машины, мало что знали о строении мозга. Они стремились создать машину, которая могла быстро и точно производить вычисления. Сходство было обнаружено позже, когда биологи стали сравнивать известные им факты с тем, что сообщали им специалисты по вычислительной технике.

Конечно, во многих отношениях память человека, его нервная система отличаются от схем вычислительной машины. Прежде всего по сложности. По сравнению с живым мозгом вычислительная машина, как бы она ни была велика,— сама простота.

Нервная система живого организма состоит из огромного числа живых клеток — *нейронов.* Каждый нейрон может возбуждаться и управлять множеством других. Он либо активен и проводит электрический сигнал, либо «отдыхает» и не проводит сигнала. Каждый нейрон универсален. Вот почему у человека нет отдельного резервуара памяти — память рассеяна по всему мозгу и связана между собой невидимыми нитями — *ассоциациями.*

А теперь представим, что нашелся конструктор, ко-

торый задался целью построить память такую совершенную, как у человека. Перед ним возникает безбрежное море вопросов. Ведь в руках у него нет ни руководства, ни схем. Он довольствуется лишь предположениями и проверкой их на электронных моделях. Но даже этот косвенный путь уже принес немало плодов.

Конечно, нерешенных проблем еще очень много — природа не так охотно, как хотелось бы, приоткрывает завесу над величайшей своей тайной. Тем не менее теперь уже можно идти от противного. ЭВМ позволяет «брать уроки у природы».

Память машины. Чтобы сделать такой урок наглядным, давайте проследим за тем, как человек с карандашом в руках решает задачу.

Прежде чем приступить к решению, мы обычно записываем исходные данные задачи, условие. Решая задачу, мы вряд ли осознаем, что пользуемся при этом заранее подготовленной программой. В нашей памяти хранятся знания об алгебраических и арифметических операциях, и мысленным взором мы видим по меньшей мере самые общие черты плана решения.

Выполняя шаг за шагом действия, необходимые для решения поставленной задачи, мы записываем (*запоминаем*) полученные результаты, снова обращаемся к ним (*отыскиваем*), когда они кажутся необходимыми для последующих этапов решения.

То же самое приходится делать и машине. И ей, как и человеку, необходимы исходные данные — как считать, из какого угла взять, куда направить. И она записывает — запоминает, отыскивает запомненные числа. Если задача не решается одним способом, машина пороется в своей памяти и попробует другой способ, третий — до тех пор, пока не придет к решению или не исчерпает всех способов, которые она знает. Для этого у нее имеются специальные запоминающие устройства.

Информация в вычислительных машинах хранится в двух основных запоминающих устройствах. И память у ЭВМ тоже двоякая.

Люди давно уже заметили, что не все запоминается одинаково. Есть определенный запас сведений, слов, понятий, которые хранятся в нашей памяти, как в архиве, всю жизнь. Это — память длительная.

Но бывает, что человеку не всегда удается в нужный момент воспроизвести и использовать ранее запомненную информацию. Наблюдается явление «отказа» памяти — забывание — стирание «следов» в мозгу. Это память кратковременная. Однако кратковременная память может перейти в длительную, если мы будем постоянно пользоваться ею или перенесем информацию, например, в записную книжку.

Все виды такой памяти есть и в машине. Здесь можно найти и листок бумаги для промежуточных вычислений — это быстрая, оперативная память. Своего рода руководство к действию. Она нужна для запоминания данных, которые часто используются машиной: вроде «два пишем, а три в уме». Их немного, но они всегда наготове.

Можно найти и записную книжку длительной, емкой памяти. Это *внешняя память* машины. Здесь хранятся данные, надобность в которых придет со временем.

Но одно дело, скажет читатель, писать числа на листке бумаги, а совсем другое — в машине. Как машина справляется в записью чисел?

Оказывается, довольно просто. Только пишет и хранит числа она на своем машинном языке.

Язык и арифметика машин. Помните детскую игру: «жарко — холодно». Один из участников ищет спрятанный предмет, а другие ему говорят «жарко», «холодно». В принципе — это инструкция к поиску, по которой один из играющих определяет место, где хранится предмет. Жарко — да, истина; холодно — нет, ложь. А можно и так: жарко — единица, холодно — нуль.

Подобное руководство можно дать и машине, например, в виде последовательности импульсов тока. Есть импульс — да, «1», нет импульса — нет, «0». Нуль и единица — вот весь алфавит машины.

Из единиц и нулей составляют любые числа, применяя двоичное счисление. Оно-то чаще всего и служит языком машины.

Принцип двоичной системы несложен. В отличие от привычной нам с детства десятичной системы, основой которой является число 10, в основе двоичной системы лежит число 2. Если в десятичной системе в каждом разряде может стоять одна из десяти разных цифр — от 0 до 9, то в двоичной, в каждом разряде может быть только 0 и 1.

С помощью двоичной системы счисления удается свести все числа и операции с числами к сочетаниям нулей и единиц. Можно присвоить двоичные номера и всем буквам алфавита — превратить любой текст в чередование нулей и единиц. Такой перевод называется двоичным кодированием.

Двоичная система позволяет машине сравнительно легко представлять и запоминать громадное количество единиц и нулей. При этом машина выполняет действия настолько быстро, что распознавание и запоминание длинных последовательностей нулей и единиц производится в сотни и тысячи раз быстрее, чем это делает человек, воспринимая привычную ему речь.

А сделать какое-либо устройство, которое с большой скоростью принимало бы два состояния, осуществляя простейший логический акт — выбор между двумя возможностями «*истина*» (1) и «*ложь*» (0), можно многими способами.

Магнитный ключ. Простейшим среди множества устройств такого типа является электрический ключ, замыкающий или размыкающий токовую цепь.

Когда ключ замкнут, в цепи есть ток и лампа, включенная в схему, горит: схема находится в состоянии «1». Когда ключ разомкнут — тока нет, лампа не горит и схема находится в состоянии «0». Ключ может быть либо замкнут, либо разомкнут. Среднего положения у него нет. Причем ключ может находиться в одном из этих положений до тех пор, пока мы не переведем его в другое. Иными словами, он может неограниченно долго фиксировать — «помнить» — включенное или выключенное состояние.

По такому же принципу работают и магнитные элементы, своеобразные магнитные ключи, которые оказались очень удобными для ЭВМ.

В зависимости от направления магнитных линий индукции магнитный ключ, подобно электрическому выключателю, может быть либо включен, либо выключен, т. е. имеет два устойчивых состояния. В любом из этих двух состояний ключ может пребывать сколь угодно долго, пока не поступит новый сигнал.

Такая возможность у магнита существует за счет необратимости процессов намагничивания. Это явление, как известно, называется *магнитным гистерезисом* и характеризуется *петлей* гистерезиса.

Гистерезис процесса — зависимость его состояния в данный момент от предыстории — это память о прошлом. Но разные магниты имеют разные петли гистерезиса. У одних память хорошая, крепкая, а у других послабее. У магнитов с хорошей памятью петля гистерезиса имеет вид почти точного прямоугольника (см. рис. 39). Такие магниты изготовляют обычно из смеси оксидов различных металлов с оксидом железа, называемых *ферритами.*

Ферриты прессуют в миниатюрные кольцевые сердечники и обжигают при высокой температуре. На готовые колечки наматываются тончайшие проволочки — обмотки. Вот и все устройство магнитного ключа.

Под воздействием управляющих импульсов электрического тока, которые подаются во входную намагничивающую обмотку, ферритовый ключ за миллионные доли секунды меняет свое магнитное состояние (рис. 45).

Пусть, например, в намагничивающую обмотку поступил импульс тока, направленный таким образом, что ферритовое кольцо достигло насыщения. Если ток выключить, то процесс пойдет по петле влево и остановится в точке, соответствующей значению остаточной намагниченности. Сколько бы времени ни прошло, если сердечник не нагревать, не ударять по нему и защищать от сильных полей, он будет оставаться в неизменном состоянии, т. е. *помнить* импульс тока, приведший его в это состояние.

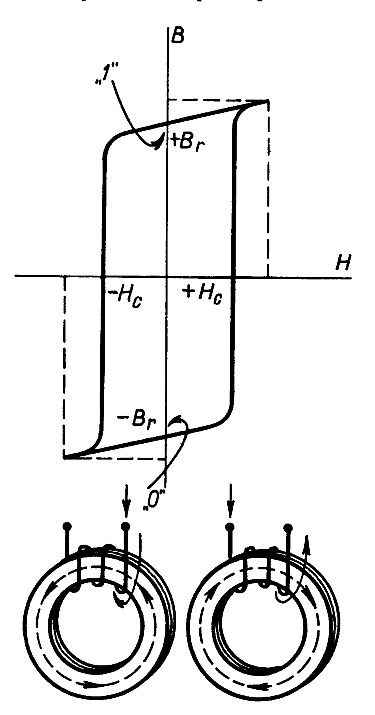


Рис. 45

Подадим теперь импульс противоположного направления. Если ток будет достаточно велик, то направление намагниченности резко изменится. Произойдет перемагничивание — переход в другое состояние. После выключения тока сердечник останется в состоянии, соот-

ветствующем индукции — B_r до тех пор, пока какое-либо внешнее воздействие не заставит его изменить это состояние.

Так, ферритовый ключ, словно выключатель, переходя из одного состояния в другое, или, как говорят, опрокидываясь, позволяет отмечать импульсы. За это свойство и ухватились создатели памяти электронных машин. Крошечная ферритовая деталь дала возможность строить удивительно работающие узлы, способные запоминать и даже выполнять логические операции.

Магнитные клетки ЭВМ. Деталь оказалась очень удобной. *Во-первых*, она может находиться в двух устойчивых положениях да еще с молниеносной быстротой переходить из одного состояния в другое. Значит, можно вести запись с помощью нулей и единиц. Попеременно перемагничиваясь, сердечник может запоминать то «1», то «0».

Во-вторых, деталь предельно проста, имеет малые размеры, надежна в работе и позволяет длительное хранение чисел без затраты энергии.

И наконец, с ее помощью можно не только записывать и запоминать импульсы, но и получать их обратно, т. е. читать записанное. Для этого через отверстие сердечника надо пропустить еще один привод. Его называют обмоткой считывания.

При всех переходах сердечника из одного магнитного состояния в другое в считывающей обмотке возникает электрический импульс. Направление этого наведенного тока будет изменяться в зависимости от направления перехода магнитных состояний. Таким образом, когда сердечник переходит из состояния «1» в состояние «0», в считывающей обмотке появляется сигнал, свидетельствующий о том, что сердечник хранил «1».

Магнитный сердечник — это уже память. Точнее, ячейка памяти. Ее с полным правом можно назвать нервной клеткой вычислительной машины.

Таких клеток-ячеек в машине десятки, сотни тысяч. Из них составляют специальные *решетки памяти*, которые затем собирают в пакеты. Тем не менее пространство, занимаемое такой памятью, не очень велико, так как сами сердечники очень малы; их диаметр часто меньше 1 мм. Чем меньше сердечник, тем быстрее он перемагничивается, а быстродействие очень важно для оперативной памяти машины. Кроме того, для перемагничи-

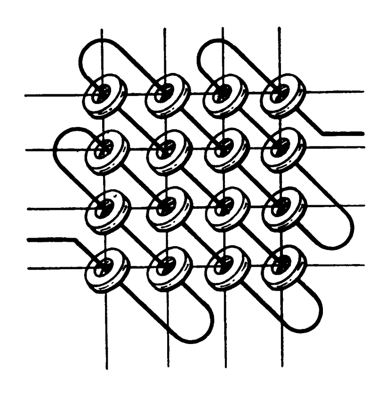


Рис. 46

вания сердечников малого размера нужна меньшая намагничивающая сила.

Принцип построения решетки памяти достаточно прост. Маленькие кольцевые сердечники нанизываются на перекрещивающиеся проволочки, которые составляют проволочный каркас (рис. 46). На одном проволочном каркасе можно разместить компактно очень большое число сердечников. Сердечники удерживаются проходящими сквозь них горизонтальными и вертикальными проводниками, по которым подаются перемагничивающие токи. Для перемагничивания маленьких сердечников требуется небольшая сила. Она может быть создана, если подать на два скрещенных провода, проходящих сквозь отверстие сердечника, импульс тока достаточной величины.

Предположим, что требуется ввести в верхнюю строчку решетки двоичное число 1010. При этом предполагается, что предварительно все сердечники были уже перемагничены в состояние «0». Для ввода числа по указанному адресу в верхний горизонтальный провод подается ток вдвое меньший, чем необходимо для записи. Индукция в сердечниках, надетых на этот провод, немного изменится, но состояния своего они еще не меняют. Все сердечники в верхней строчке окажутся под воздействием полутоков, но это ни к чему не приводит, так как одного полутока недостаточно для перемагничивания сердечника. Чтобы написать число, надо одновременно с подачей тока на горизонтальный провод подать такой же полуток на те вертикальные провода, которые проходят через сердечники, где нужно записать «1». В этом случае на сердечник, расположенный в точке пересечения проводов, воздействует полный ток. Индукция в сердечнике изменится, и он перейдет в состояние $+B$, т. е. запишет «1».

На все остальные сердечники воздействует только ток в горизонтальном проводе, составляющий лишь половину необходимого для записи. Их магнитное состояние оста-

нется неизменным. Они продолжают «хранить» прежние двоичные числа, т. е. «0».

Для считывания чисел через все сердечники решетки, по диагонали, пропускают еще один провод. В него-то и поступает серия импульсов, соответствующая записанному числу.

Допустим, надо считать информацию с сердечника, расположенного в третьем ряду второго столбца. Для этого необходимо подать импульсы тока в соответствующие провода записи. В считываемом проводе возникает ток считывания, наведенный только этим сердечником. Все остальные сердечники в это время не действуют. Так, например, если в указанном сердечнике была записана «1», он перемагничивается в «0» и появляющееся изменение магнитной индукции возбуждает в считывающем проводе ЭДС. Если же в сердечнике был записан «0», магнитная индукция не изменится и выходной сигнал будет отсутствовать. Для восстановления прежнего состояния этого сердечника через провода записи снова пропускают ток записи.

Магнитный архив. Память на ферритовых сердечниках чаще всего используется в качестве главной, оперативной памяти машины. Такая память нужна для хранения ограниченного числа данных, которые часто используются машиной. Это память быстрая, всегда находится в состоянии готовности и при первой необходимости может быть считана.

Однако долго хранить данные в оперативной памяти машины невыгодно. Если расчет закончен, надо передать результат системе внешней, длительной памяти. Во внешнюю память можно записывать сотни тысяч, миллионы чисел. Из такого магнитного архива числа по мере надобности могут выдаваться в любой нужной комбинации.

В качестве внешней памяти в современных ЭВМ широко используются магнитные ленты, барабаны и диски.

Магнитная лента в вычислительных машинах в принципе аналогична ленте обычных магнитофонов и отличается лишь шириной. Запись на ленту производится по отдельным дорожкам или каналам, расположенным вдоль ее длины. Против дорожек установлены головки записи и считывания.

Кассеты с магнитными лентами легко меняются во время работы машины, что позволяет увеличить магнитную память. Больше лент — больше чисел. Поэтому па-

мять на магнитных лентах используется во всех случаях, когда приходится иметь дело с длинной программой или большим объемом данных. Но отыскание в памяти нужной информации из-за большой длины магнитных лент происходит медленно. Все, кто имел дело с магнитофоном, знают, каким длительным и трудоемким бывает процесс перемотки ленты для отыскания нужного места. Иногда для этого приходится просмотреть всю ленту, но оперативной памяти машины такая задержка недопустима.

Поэтому возникла необходимость еще в дополнительной, промежуточной памяти, которая совмещала бы в себе достоинства обоих устройств: большое количество запоминаемых данных и быстроту их выборки. В качестве промежуточной памяти чаще всего применяются магнитные барабаны и диски.

Магнитную ленту можно представить себе как очень длинную, «тонкую» память. Время поиска нужной информации так велико потому, что одна считывающая головка должна просмотреть эту ленту по всей длине. Но если бы мы разрезали ленту на куски, каждый из которых обслуживался бы своей головкой, время поиска стало бы меньше, так как каждая головка просматривала бы довольно короткий участок ленты. Эта идея реализована в магнитном барабане, который можно сравнить с короткой, «толстой» памятью. Барабан по сути дела представляет собой широкую, замкнутую в кольцо магнитную ленту (рис. 47, *а*). Его обслуживает большое число магнитных головок, и каждая контролирует только небольшую часть информации, умещающуюся на длине окружности барабана (рис. 47, *б*). Таким образом, вместо одного длинного следа получается множество коротких окружностей. Чем больше скорость вращения барабана, тем меньше время отыскания нужной информации. Память на барабанах надежна, экономична и проста.

Большое распространение в последние годы получила также дисковая память (рис. 47, *в*). Диск покрыт магнитным слоем, на который информация наносится в виде концентрических дорожек. Во время работы диск или пакет дисков приводится в очень быстрое вращение. Магнитные головки устанавливаются в определенную позицию над вращающимся диском и при прохождении под ними ячейки осуществляют запись и считывание информации. Диски выгодны тем, что, переставляя головку,

можно быстро получить доступ к любому куску массива информации.

На повестке дня. Память — основа основ ЭВМ. В современных машинах она должна быть и емкой, и быстродействующей, и компактной. Сейчас число отыскивается и выбирается из «памяти» за доли микросекунд. Но и это уже считается недостаточным. Требуется еще большая скорость. Ведь за время своих вычислений машина неоднократно обращается к своей памяти. Поэтому очень важно создать сверхбыструю память, да еще значительной емкости. Поиски идут в различных направлениях. Используются физические и химические свойства магнитных кристаллов, привлекаются новые физические принципы и явления.

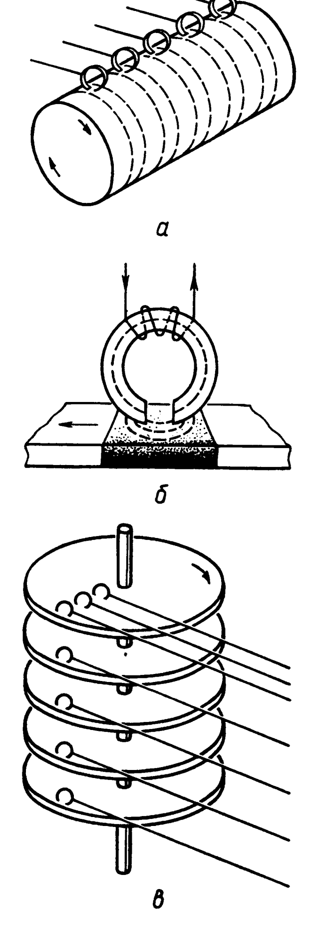


Рис. 47

Стремясь сделать память быстрой, емкой и компактной, специалисты пытаются обучить двоичному счету даже магнитные домены. И сегодня речь идет уже не об отдельных магнитных элементах машины, а об однородной вычислительной среде, в которой элементарными носителями информации являются сами домены.

Хотя это направление зародилось сравнительно недавно, оно уже привлекло к себе пристальное внимание специалистов. Особый интерес представляют собой доменные устройства хранения и переработки информации на базе магнитоодноосных кристаллов и пленок, содержащих *цилиндрические магнитные домены (ЦМД)*.

Вспомните, какими замечательными свойствами обладают крошечные магнитные «пузырьки». Их можно контролируемо создавать и уничтожать, осуществляя та-

ким образом ввод и стирание информации, регистрировать их присутствие или отсутствие в любой точке кристалла, наконец, перемещать с высокой скоростью вдоль некоторого выбранного канала. Любое двоичное число можно представить цепочкой подвижных ЦМД, где «единице» соответствует наличие домена в определенной точке среды, а «нулю» — его отсутствие.

Эта ситуация весьма напоминает магнитную ленту, на которой записаны двоичные данные. Однако имеется одно существенное отличие — в ЦМД-элементе магнитная картина движется внутри *неподвижного материала.* При наличии, например, неоднородного магнитного поля домены смещаются в сторону меньших магнитных полей, стремясь занять положение с минимальной энергией. Если определенным образом сформировать в кристалле локализованные минимумы поля, то можно поочередно перемещать домены по этим «ловушкам», создавая ситуацию «да» — «нет».

Взяв за основу пленки с ЦМД, создатели доменных схем подвергают их технологической обработке с помощью физических и химических средств. Тончайшим узором проводниковых (токовых) или ферромагнитных микроэлементов — аппликаций покрывается вся поверхность материала. В результате на поверхности образуется сложная сеть микроячеек — ловушек, которые создают в пленке канал распространения ЦМД, определяющий траекторию движения доменов. Можно переводить домены из одного канала в другой, делить их (что эквивалентно усилению сигнала), наконец, заставить домены взаимодействовать друг с другом так, чтобы создавались новые сигналы, связанные определенными логическими соотношениями с входными ЦМД. Словом, в малюсеньком кусочке материала происходят сложные взаимосвязанные, целенаправленные процессы, течет своеобразная «доменная жизнь».

Доменные структуры отличаются большой емкостью, быстродействием, очень малым расходом энергии и исключительно малыми габаритами. Доменный блок, выполняющий целый комплекс расчетных или логических операций, может свободно уместиться в спичечной коробке.

А какие элементы появятся через десять, двадцать лет? Если заглянуть вперед, то можно увидеть, как прямо из растворов выращиваются системы кристаллов — гото-

вые схемы вычислительной техники и автоматики. Физика твердого тела уже научила нас видеть в кристаллах прибор для разнообразных применений. Симметричная решетка доменов, составляющих кристалл, с ее сложными и стройными природными механизмами сможет содержать миллиарды элементов для практически неограниченной «памяти» машины и гигантского быстродействия.

Магнитная запись сигналов. Магнитная запись является пока самым распространенным способом записи информации. Она применяется буквально во всех отраслях знаний и многих видах искусства.

Хотя магнитная запись и ставит перед инженерами множество проблем, принципы ее просты. Карандаш, двигаясь по бумаге, оставляет на ней графитовый след. Точно так же в процессе магнитной записи магнитная головка оставляет на магнитной ленте, барабане или диске магнитный след.

Лента — наиболее распространенный тип носителя магнитной записи. Она называется магнитной, так как представляет собой гибкую пластмассовую пленку (основу), на которую нанесен слой, состоящий из очень тонко размолотого порошка магнитотвердого материала, смешанного с лаком и прочно сцепленного с основой.

Магнитный порошок (он может состоять из оксидов железа или хрома) можно намагнитить, после чего его намагниченность может сохраняться в течение многих лет.

В процессе записи магнитная лента передвигается под электромагнитом, через обмотку которого проходит ток записываемого электрического сигнала. Такой электромагнит называют *записывающей* головкой. Она представляет собой сердечник из магнитомягкого материала с обмоткой из изолированного провода. В одном месте сердечника имеется небольшой зазор. Этот зазор находится очень близко от поверхности перематывающейся ленты, так что часть магнитного потока, идущего через зазор, проходит через магнитное покрытие ленты.

Пока в обмотке тока нет, сердечник не намагничен и не оказывает влияния на магнитную ленту. Когда же по обмотке пропускают ток, ее сердечник намагничивается и намагничивает участок ленты, проходящий перед зазором головки. Величина этого участка и ограничивает плотность записи, с которой информация может быть пе-

ренесена на поверхность магнитной ленты. Схематически этот процесс иллюстрируется на рисунке 48.

Так как в режиме записи по магнитной головке циркулирует переменный ток, то намагниченность рабочего слоя магнитной ленты меняется как по модулю, так и по направлению. Образуется как бы цепочка магнитов, расположенных вдоль носителей записи. В самом деле, участки рабочего слоя ленты, намагниченные в одном направлении, — это те же самые магниты со свойственным им магнитным полем.

Таким образом, в результате процесса записи на магнитной ленте оказывается зафиксированным определенный сигнал в форме переменной намагниченности по длине ленты. Если теперь магнитную ленту с нанесенной записью протягивать под той же самой или другой головкой, точно такой же конструкции, как и записывающая, то в ней будет индуцироваться ток, соответствующий записанному сигналу. Эту головку называют *воспроизводящей.*

В те моменты, когда перед зазором воспроизводящей головки оказывается намагниченный участок ленты, линии магнитной индукции врываются в сердечник, пронизывают обмотку и наводят в ней электродвижущую силу.

Характерной особенностью магнитной записи является то, что она не нуждается в какой-либо промежуточной обработке и может быть воспроизведена немедленно. Запись легко может быть «стерта». Такой процесс осуществляется отдельной стирающей магнитной головкой, через обмотку которой пропускается обычно ток высокой часто-

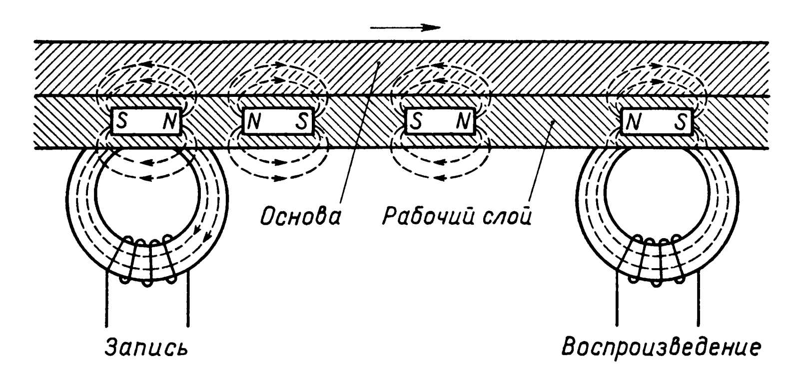


Рис. 48

ты. Высокочастотное поле многократно меняет ориентировку элементарных магнитиков, установленных при записи определенным образом, и их ориентировка вновь становится хаотической. Стирающую головку обычно располагают так, чтобы старая запись сначала стиралась, а затем уже лента поступала на новую запись. Благодаря этому запись всегда ведется на «чистую» ленту вне зависимости от того, было ли на ней что-либо записано.

Магнитная запись и воспроизведение звука. А теперь поговорим о том, что знакомо. О приборах для записи звука на магнитную ленту — магнитофонах.

Для того чтобы записать звук на магнитофонную ленту, необходимо прежде всего превратить звуковые сигналы в электрические. Это делают *микрофоны*.

Микрофон — устройство несложное. Вот, например, микрофон, в принципе работы которого использован всем известный закон Ома. Мембрана вибрирует под действием звуковых колебаний и сжимает расположенный рядом с нею слой угольного порошка. Когда давление на мембрану усиливается, а это происходит в момент прихода гребня волны, она сильнее сжимает слой порошка. Частицы плотнее соприкасаются друг с другом и легче пропускают электрический ток. В этот момент ток возрастает. Сколько раз придут на мембрану гребни и впадины волн, столько раз будет увеличиваться и уменьшаться электрический ток в цепи.

Итак, микрофон включен. Он превращает звуковые колебания воздуха в переменный ток. Этот ток усиливается усилителем записи и поступает на записывающую головку, мимо которой проходит магнитная лента (рис. 49). Перед тем как пройти мимо записывающей головки, лента проходит мимо стирающей головки, где она полностью размагничивается.

Для воспроизведения звука магнитофонная лента с записью перемещается под воспроизводящей головкой с той же самой скоростью, с какой она передвигалась у записывающей головки. При этом могут быть использованы отдельные головки для записи и отдельные для воспроизведения или одна и та же головка может использоваться в процессе записи в качестве записывающей, а затем при воспроизведении в качестве воспроизводящей. Такая переключающаяся головка называется универсальной.

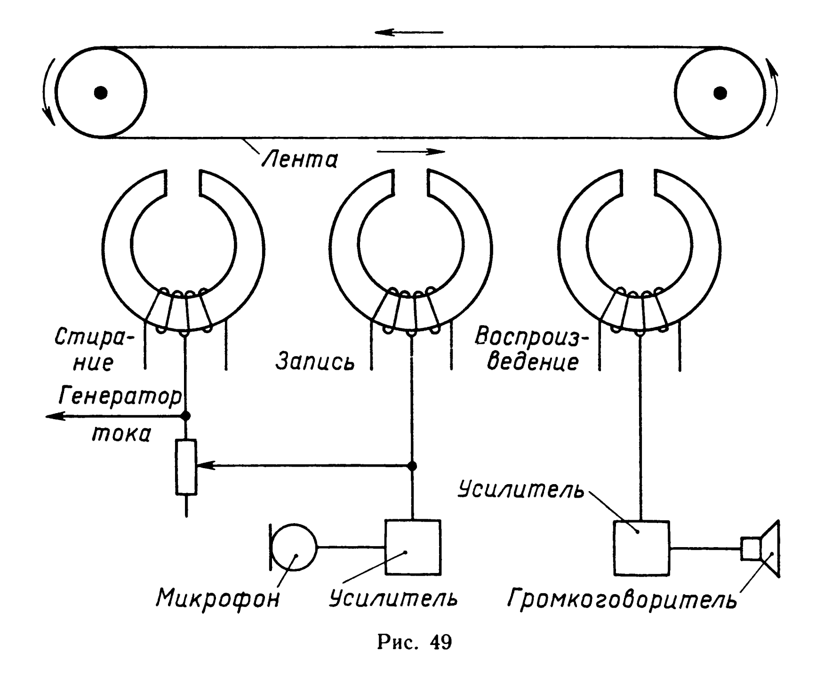


Рис. 49

Когда под воспроизводящей головкой проходит лента, намагниченные участки индуцируют в катушке головки соответствующие напряжения, которые представляют собой воспроизведенный электрический сигнал. Затем эти напряжения усиливаются усилителем воспроизведения, поступают в громкоговоритель и преобразуются в звук.

Однако при воспроизведении записи, сделанной одним лишь током записываемого сигнала, звук, как оказалось, получается заметно искаженным. Сказывается нелинейность намагничения ферромагнетика, и распределение остаточной намагниченности не соответствует по форме записываемому сигналу.

Чтобы избежать подобных явлений и устранить искажения, к току записи подмешивают ток высокой частоты. Для этого к записывающей головке, помимо сигнала, подлежащего записи, от внутреннего генератора подводится ток сверхзвуковой частоты (ток высокочастотного подмагничивания). Частота этого тока выбирается настолько большой, чтобы каждый элемент носителя при прохождении в районе рабочего зазора записывающей

головки испытывал несколько циклов перемагничивания. В этом случае высокочастотное поле как бы трясет внутреннюю структуру мелких частиц, и их перемагничивание низкочастотным (звуковым) полем происходит точно в соответствии со значением индукции этого поля.

Таким образом, магнитное поле, создаваемое головкой записи, по сути дела является результирующим двух полей — тока записываемого сигнала и вспомогательного тока высокочастотного подмагничивания. Поэтому в составе современного магнитофона почти всегда имеется генератор тока высокочастотного подмагничивания. Кстати говоря, этот же генератор используют также для того, чтобы стереть ранее сделанную запись.

Так невидимое «перо» — магнитное поле — ведет на ленте невидимую запись сигналов, в которые микрофон преобразует звук. Эти сигналы записываются вдоль магнитофонной ленты как одна длинная строка.

Совершенно очевидно, что чем больше длина строчки записи, тем продолжительнее получается сама запись. С этой точки зрения лучше применять более тонкую ленту. Однако, чем тоньше лента, тем труднее обеспечить ее прочность, избежать вытягивания. Магнитофоны старых выпусков были рассчитаны на толстую и прочную ленту. В новых моделях применяют ленту толщиной 37 мкм и меньше на лавсановой основе. Изготовляют ленту перфорированной (с просечками, как у киноленты) и неперфорированной, разной ширины, толщины и длины, с магнитными свойствами, различающимися в довольно широких пределах.

Интересно, что самые тонкие из выпускаемых сейчас лент уже нельзя заправлять вручную без опасности повреждения. Приходится заключать катушку с лентой в специальную кассету и заменять целиком всю кассету. Поскольку ширина, длина и масса магнитной ленты снизились, и притом значительно, все детали механизма магнитофона, да и сам он в целом, стали миниатюрными.

Еще одна особенность — увеличение числа трактов записи. Теперь на одной и той же ширине ленты удается разместить две, четыре и даже восемь дорожек записи. Это дает возможность увеличить продолжительность записи на одной и той же ленте, а также позволяет осуществлять стереофоническую (объемную) запись.

МАГНИТ НАБИРАЕТ СИЛУ

...И растет ребенок там
Не по дням, а по часам

А. С. Пушкин

В современной истории материальной культуры магнит — это столь же универсальное творение, как рычаг или колесо, преобразующее все области жизни. Им пользуются специалисты множества областей, начиная от физиков и кончая биологами и медиками. И не только специалисты. Магниты нужны всем. В магнитофонах и проигрывателях, радиоприемниках и телевизорах, электробритвах и пылесосах... — всюду работают магниты.

Однако это относительно слабые магниты: их поле не достигает и 1 тесла (Тл), а сфера действия ограничивается кубическими миллиметрами. В современной физике и технике применяются магниты, во много раз превышающие по размерам рабочей области и величине магнитной индукции эти небольшие устройства. Можно назвать сотни разнообразных физических, технических и чисто инженерных практических задач, которые объединяются общим требованием: для их осуществления нужны сильные магнитные поля. Речь идет и об энергетике, создающей новые генераторы, и о водолазных работах по подъему затонувших судов, и о физике, занятой проблемами термоядерного синтеза и ускорением элементарных частиц... Все это области, где требуются грандиозные, невиданные раньше по размерам и силе магниты. Но вот ключа к проблеме создания мощных и экономичных магнитов ученые долгое время не могли найти.

Ключ к магниту. Казалось бы, что тут сложного. Достаточно пустить сильный ток по виткам соленоида, и он станет мощным магнитом. С тех пор как Ампер выяснил, что *соленоид* ведет себя так же, как и природный магнит,

все современные электромагниты изготавливаются по этому принципу. В каждом из них есть спираль (обмотка), по которой протекает ток. Чем больше сила тока, тем сильнее магнитное поле.

Электромагниты теоретически не имеют предела по своей силе. Действительно, индукция $\vec{B}$ магнитного поля, возникающего вокруг проводника с током I, пропорциональна силе тока и магнитной проницаемости среды μ и зависит от формы проводников. Так, для кольцевого витка с током $B=\frac{\mu\mu_0 I}{2R}$, где R — радиус витка. В соленоиде поля отдельных витков суммируются и индукция растет.

Однако с увеличением поля растут и силы, действующие со стороны магнитного поля на соленоид. Вспомните: на элемент проводника длиной Δl с силой тока I, находящийся в магнитном поле индукцией $\vec{B}$, действует сила $F=BI\Delta l\sin\alpha$, где α — угол между вектором $\vec{B}$ и направлением тока. Значит, на провод с током будут действовать силы, пропорциональные силе тока и индукции поля, создаваемого соленоидом. Эти силы увеличиваются с увеличением поля и стремятся разорвать соленоид и, кроме того, прижимают крайние витки к средним. В мощных магнитах давление поля на внутренние секции столь велико, что материал обмотки начинает «течь».

Но это еще не все. При силе тока I в проводнике сопротивлением R выделяется мощность $P=I^2R$. Эта мощность пропорциональна I^2, и, следовательно, она будет увеличиваться с увеличением индукции создаваемого поля. Значит, если усилить магнитное поле, например, в десять раз, необходимо увеличить мощность в сто раз... Расширение объема рабочего пространства также будет сопровождаться увеличением выделяющейся мощности. Отсюда получается, что для питания одного мощного магнита требуется целая электростанция, а для охлаждения соленоида — водокачка.

Чтобы как-то снизить потребляемую магнитом мощность, внутрь катушки с током вставляют стальной сердечник. Сердечник внутри катушки сильно намагничивается, и поле его складывается с полем спирали. Так можно добиться существенного снижения потребляемой мощности, но ... вес магнита возрастает в сотни раз из-за стальной брони, окружающей соленоид снаружи и изнутри.

Не лучше обстоит дело и с размерами мощных магнитов. В магнитах со стальным сердечником трудно получить поля свыше 2 Тл. При увеличении силы тока в обмотке намагничивание сердечника начинает замедляться, и сталь приближается к состоянию магнитного насыщения. В состоянии насыщения сердечник практически бесполезен. Поэтому конструкторы для достижения желаемого эффекта часто вынуждены увеличивать размеры магнитов.

Как получают сильные магнитные поля. Водоохлаждаемые соленоиды. Итак, основные проблемы, стоящие на пути получения сильных магнитных полей, — это *проблема потребляемой магнитом мощности* (а значит, и теплоотвода) и *проблема прочности.* Как же решаются эти проблемы?

Сейчас трудно представить, насколько сложной была задача создания мощных магнитов. Что могли физики противопоставить природе? Только очень точный учет «за» и «против» — оптимальную конструкцию и полное использование природных свойств материала.

Так появились магниты нового типа. Они не поражали размерами, однако с их помощью можно было получать поля индукцией до 30—40 Тл.

В основе — все тот же соленоид Ампера. Но по конструкции современные соленоиды мало чем напоминают традиционную катушку с током. Вместо обычного, круглого в сечении провода — медная лента (шина) или набор штампованных дисков. Делается это для более эффективного охлаждения. Ведь тепло отводится с поверхности проводника, и, чем больше площадь поверхности, тем лучше теплоотвод.

Но этого мало. Чтобы соленоид не нагревался, его надо постоянно охлаждать — иначе магнит сгорит. Так, в магните, индукция которого 10 Тл, расходуется мощность порядка 1,5 МВт. Вся эта мощность выделяется в виде теплоты. Для охлаждения соленоида приходится прокачивать сквозь него сотни литров воды в минуту, и эта вода выходит нагретой почти до кипения. Причем поток воды не должен ослабевать — иначе вода закипит, теплоотвод ухудшится и соленоид разрушится. Поэтому поток воды должен быть по возможности короче и шире, чтобы сопротивление течению воды было мало, а поток ее соответственно велик. Значит, направление потока воды должно быть не параллельно току, а перпендикулярно

ему. На этой идее основаны три основные конструкции соленоидов, показанные на рисунке 50.

В конструкции *1* вода течет вдоль оси соленоида и между витками по радиусам. В конструкциях *2* и *3* — параллельно оси соленоида либо сквозь витки (*2*), либо между ними (*3*). В настоящее время на соленоидах типа (*2*), разработанных американским физиком Биттером, получают магнитные поля, индукция которых 30—40 Тл. Обмотка соленоида представляет собой штампованные медные диски с отверстиями для охлаждающей жидкости. Для более эффективного охлаждения желательно было бы сделать как можно больше каналов для протекания жидкости. Но это привело бы к увеличению сопротивления соленоида и усложнило бы и без того непростую проблему прочности.

Это последнее обстоятельство чрезвычайно существенно. При больших полях давление магнитного поля столь велико, что соленоид разрушается. Чтобы оценить силу, рожденную магнитным полем, достаточно привести такой пример. При поле, индукция которого 100 Тл, магнитные усилия эквивалентны тем, которые развиваются в жерле пушки при выстреле! Попробуйте удержать такое поле! Естественно, магнит надо усиливать. Для этого между витками прокладывают изоляцию, имеющую высокую прочность на сжатие, например слюду или керамику. По той же причине обмотку делают из медных сплавов повышенной прочности. Сам же соленоид помещают в прочную наружную оболочку, которая и воспринимает разрывающие усилия.

Но прочность изоляции, прочность обмотки и оболочки не беспредельны. Другое направление — так называемые *малосиловые* или *бессиловые* соленоиды. Витки в

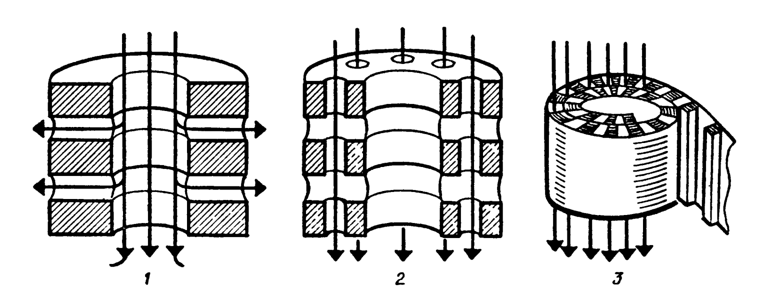


Рис. 50

таких соленоидах располагаются так, чтобы угол между вектором $\vec{B}$ и направлением тока был по возможности минимальным — тогда силы, действующие со стороны магнитного поля на соленоид, уменьшаются. К сожалению, устранить эти силы полностью не удается. Но ослабить их действие — вполне реальная задача. «Бессиловая» конфигурация как бы преобразует высокое давление, действующее в малой области, в низкое давление, распространенное на большую область. При этом способность соленоида противостоять разрушающему действию магнитных сил значительно возрастает.

Криогенные соленоиды. Обратимся еще раз к формуле $P = I^2R$. Выделяющаяся в соленоиде мощность пропорциональна сопротивлению. Чем меньше сопротивление R материала обмотки, тем больше индукция магнитного поля в соленоиде при заданной мощности. При заданной индукции мощность, затрачиваемая на получение магнитного поля, уменьшается пропорционально сопротивлению обмотки. Наконец, если заданы и мощность и магнитное поле, то уменьшение сопротивления позволяет увеличить рабочий объем соленоида.

Один из способов уменьшения сопротивления — охлаждение обмотки. Разработка низкотемпературных соленоидов тесно связана с развитием криогенной техники — техники получения низких температур. Широко распространенным методом получения температур в области до 90 К (т. е. до —183 ° С) является ожижение газов. Эффективность ожиженных газов как охладителей характеризуется температурой кипения при атмосферном давлении и удельной теплотой парообразования.

Жидкий кислород кипит при температуре 90 К, жидкий азот — при 77 К, а водород — при 20,4 К. Так вот, медный соленоид, охлаждаемый жидким азотом или водородом, уменьшает свое сопротивление соответственно в 8 и 100 раз, во столько же раз уменьшается отводимая мощность. Заменив медь на алюминий при $T = 21$ К, можно уменьшить сопротивление, а стало быть, и выделение теплоты еще почти в 10 раз.

Но у криогенных соленоидов есть важный недостаток — большой расход сравнительно дорогого хладоагента. Теплота преобразования сжиженных газов во много раз меньше, чем теплоемкость воды (при нагреве ее от 10 до 90°С), и для отвода одного и того же количества теплоты необходимо гораздо больше жидкого газа, чем

воды. Ясно, что стоит это не дешево. Поэтому криогенные соленоиды широкого распространения не получили, тем более что у них появились конкуренты.

Эта странная сверхпроводимость. То, что при низких температурах электрическое сопротивление различных металлов и сплавов резко снижается, совершенно бес спорно. Это непосредственно экспериментальный факт К этому же приводит и теория.

А дальше? Что произойдет, если продолжать понижать температуру; речь идет о температурах, отличающихся лишь на несколько градусов от абсолютного нуля. При таких температурах происходит много удивительного. Ртуть, например, замерзает так, что ею можно забивать гвозди. Резина от удара молотком разлетается на осколки, а некоторые металлы становятся хрупкими, как стекло. Все это любопытно, но не в этом суть дела.

Оказывается, ниже определенной (критической) температуры у многих металлов и сплавов внезапно, скачком, исчезает электрическое сопротивление. Здесь начинается та область, удивительная и порой парадоксальная, которая называется *сверхпроводимостью.*

Сверхпроводимость была открыта в 1911 г. голландским физиком X. Камерлинг-Оннесом. Работая в своей Лейденской лаборатории, он случайно обнаружил это явление и поначалу принял его за погрешность эксперимента. Но вскоре сам Оннес понял, что сверхпроводимость не ошибка, а совершенно новое необъяснимое явление.

Последующие, более тщательные исследования показали, что сверхпроводимость наблюдается только при определенных условиях, а именно если температура сверхпроводящего вещества ниже некоторой критической температуры $T_к$, а проходящий по сверхпроводнику ток и индукция магнитного поля ниже критических значений $I_к$ и $B_к$. Существование критических $T_к$, $I_к$ и $B_к$ как раз и ограничивает техническое применение сверхпроводимости. Если бы таких ограничений не существовало, то сверхпроводники буквально царили бы в технике. Это было бы целой революцией, и человечество сэкономило бы миллионы киловатт, растрачиваемых понапрасну не только в обмотках магнитов, но и в обмотках электрических машин и аппаратов. Наконец, можно было бы передавать электроэнергию по сверхпроводящим линиям без потерь.

Отсутствие электрического сопротивления — это, ко-

нечно, основное свойство сверхпроводящего состояния. Но не единственное. Еще одной важнейшей особенностью сверхпроводников является их *диамагнетизм*. Сверхпроводники — *идеальные диамагнетики*. Именно диамагнетизмом объясняется показываемый иногда в физических лабораториях опыт с «парящим магнитом».

Представьте себе магнит, который свободно парит в воздухе над слоем сверхпроводящего материала. Здесь есть где разыграться фантазии. Эта тема дает такой простор для воображения, что мы могли бы долго заниматься обсуждением разных диковинных вещей, которые неожиданно окажутся вполне реальными.

Для нас же в этом опыте важно то, что он демонстрирует идеальный диамагнетизм некоторых сверхпроводников. Магнитное поле не может проникать в сверхпроводник и создает подушку, на которой покоится наш магнит. При этом сверхпроводник ведет себя так, как если бы внутри него индукция $B=0$, а это присуще идеальным диамагнетикам, обладающим нулевой магнитной проницаемостью. Для линий индукции магнитного поля диамагнетик непреодолимая преграда — плоскость, от которой, словно от зеркала, отражаются силовые линии. Однако если хоть в одной точке этого «зеркала» диамагнетизм сверхпроводника будет нарушен, то появится «дырка». «Дырка», конечно, не в обычном механическом смысле. Просто в этой точке сверхпроводник теряет свои свойства и переходит в «нормальное» состояние, а плоскость для магнитного поля превращается в кольцо. То самое кольцо, виток, пропустив по которому электрический ток мы будем иметь готовый электромагнит.

Почему сверхпроводимость наблюдается при низких температурах. Сверхпроводимость известных до сих пор материалов существует лишь при крайне низких температурах, очень близких к абсолютному нулю. Так, ни один из известных сверхпроводников не может оставаться в сверхпроводящем состоянии при температуре выше 24 K. Это значительно ниже той области температур, которую можно получить с помощью обычной охлаждающей системы.

Для получения низких температур пользуются жидким водородом или жидким гелием (их температура кипения соответственно равна 20,4 и 4,2 K). Следовательно, чтобы использовать явление сверхпроводимости, необходимо сжижать гелий или водород, а это, разумеется,

сильно ограничивает технические применения сверхпроводников.

Конечно, область применения сверхпроводников неизмеримо расширилась, если бы удалось создать сверхпроводящие материалы с критической температурой $T_к$, хотя бы равной температуре жидкого азота (77 К = = —196 °С), а еще лучше — комнатной. Но вот что говорят физики: для известного механизма сверхпроводимости невозможно получить материал, остающийся сверхпроводящим *при температуре выше 40 К* (—233 °С). Речь, как видите, не в том, что мало металлов и сплавов «проверили на сверхпроводимость». Напротив, нет, наверное, сплава, который не был бы изучен с этой точки зрения. Здесь дело явно в самой природе явления.

Сверхпроводимость, как выяснилось, проявляется в тех случаях, когда электроны в металле притягиваются друг к другу. Оказывается, при взаимодействии электронов проводимости с колебаниями кристаллической решетки между электронами может возникать притяжение, преобладающее над электростатическим (кулоновским) отталкиванием. Если такое притяжение имеет место, то электроны с противоположным импульсом (импульс равен произведению массы на скорость) как бы «слипаются», образуя пары электронов. Чтобы разорвать такую пару, нужно затратить некоторую энергию.

Таким образом, в сверхпроводнике возникает особый вид упорядоченной структуры. Пары оказываются взаимосвязанными и не могут двигаться независимо друг от друга. Когда происходит рассеяние пары на атомах (а именно это рассеяние и есть причина сопротивления), то отскакивание одного из членов пары в сторону компенсируется поведением его «друга». Компенсируется в том смысле, что суммарный импульс пары электронов остается неизменным. Рассеяние электронов не исчезает, но перестает влиять на прохождение тока.

Наряду со спаренными электронами в сверхпроводнике существуют и обычные, нормальные электроны. Таким образом, одновременно существуют как бы две жидкости — одна обычная, другая сверхпроводящая. Если температура сверхпроводника начинает повышаться, то тепловое движение будет разрывать все большее число пар электронов — доля обычных будет расти. Наконец, наступит критическая температура $T_к$, при которой исчез-

нут последние спаренные электроны. При этом значение $T_к$ оказывается одного порядка с энергией спаривания. Отсюда и основной количественный результат теории: максимальная критическая температура не может превосходить 30—40 К. Вывод, прямо сказать, малообнадеживающий.

Но значит ли это, что проблема высокотемпературной сверхпроводимости принципиально неразрешима? Не может ли притяжение между электронами быть эффективнее за счет каких-то других механизмов взаимодействия? Этого мы пока не знаем. Во всяком случае четкий и окончательный ответ на этот вопрос еще не получен. Сейчас ясно одно: высокотемпературную сверхпроводимость можно и нужно искать. Эта проблема не только стоит на повестке дня, но и принадлежит к числу самых актуальных и интересных в современной физике.

Материалы для сверхпроводящих обмоток. Изучение сверхпроводящих материалов представляет интерес в двух аспектах: в теоретическом — для более глубокого понимания явления сверхпроводимости, и в прикладном — для создания сверхпроводящих магнитов.

Однако долгие годы объектами для исследования сверхпроводимости служили материалы, практическое применение которых резко лимитировалось очень низкой критической температурой $T_к$ и сравнительно небольшими значениями критического поля $B_к$. Так, для первого открытого сверхпроводника — ртути — значение $T_к$ составляло всего 4,1 К, для свинца — 7,3 К, для ниобия — 9,2 К. Что же касается ограничения, связанного с $B_к$, то даже слабое магнитное поле — самое большее в 0,1—0,2 Тл — уничтожало сверхпроводимость и гасило радужные надежды физиков и электротехников. Поскольку такие слабые поля проще было получать с помощью постоянных магнитов, то реализацией идеи создания сверхпроводящих магнитов долгое время никто серьезно не занимался.

Так прошло почти полвека. Только в 1961 г. были получены предсказанные ранее советскими учеными сверхпроводники второго поколения — сплавы, обладающие исключительно высокими критическими параметрами. Чтобы представить себе, чего стоила эта победа, достаточно привести следующие цифры: проволока из сплава ниобия с оловом — Nb_3Sn оставалась в сверхпроводящем состоянии в поле 8,8 Тл даже в том случае, когда одно-

временно по проволоке пропускали ток плотностью 1000 А/мм^2!

С тех пор было открыто и изучено более тысячи сверхпроводящих сплавов и соединений. Получены сверхпроводники с критическими полями более 30 Тл. Сейчас уже создано большое число сверхпроводящих электротехнических материалов, которые можно успешно использовать в электромагнитах. Среди них такие сплавы, как ниобий — цирконий, ниобий — титан, ниобий — германий. Они хорошо обрабатываются, и из них сравнительно легко можно получить проволоку. Особенно важно, что эти сплавы обладают достаточно высокими критическими температурами. Например, тот же сплав ниобия с оловом остается сверхпроводящим до 18 К, а некоторые соединения ниобия с германием имеют критическую температуру около 23 К.

Высокие критические параметры сверхпроводников второго поколения сделали реальными планы их использования в технике. Сверхпроводимость начала как бы вторую жизнь, но теперь уже не в качестве любопытного лабораторного феномена, а как явление, открывающее перед инженерной практикой серьезные перспективы.

Сверхпроводящие магниты. Как и следовало ожидать, техническое использование сверхпроводимости началось с создания крупных сверхпроводящих магнитов. Это и понятно. Применение сверхпроводников в конструировании магнитов наиболее близко природе сверхпроводимости. Если сделать из такого материала обмотку и соленоид охладить до температуры ниже критической, то его сопротивление станет равным нулю. Значит, сверхпроводящие соленоиды могут работать, почти не потребляя электроэнергии, поскольку однажды возбужденный в них ток не затухает. Нужно только поддерживать соленоид при низкой температуре, а для этого требуются очень малые мощности. Таким образом, эксплуатация сверхпроводящих магнитов исключает потребность в больших источниках энергии. Для питания годятся обычные батареи, генераторы или аккумуляторы.

Решается и проблема теплоотвода. Если сопротивление равно нулю, то равна нулю и выделяемая мощность. Правда, проблема прочности остается, поэтому «рекордных» полей сверхпроводящие соленоиды не создают. Но зато они и легче и меньше по размерам, чем обычные, водоохлаждаемые. По сравнению с криогенными сверх-

проводящие соленоиды требуют в сотни раз меньшего расхода хладагента. Так, при индукции магнитного поля 10—15 л сверхпроводящий магнит весит всего несколько десятков килограмм и со всем относящимся к нему оборудование занимает площадь несколько квадратных метров и расходует примерно десять литров жидкого гелия в сутки. И это вместо десятков тонн и тысяч киловатт энергии, которые потребовались бы для работы несвер проводящего магнита с теми же параметрами. Особенно наглядно проявляются достоинства сверхпроводящих магнитов, когда нужно получить сильное магнитное поле в большом объеме.

Конечно, постройка сверхпроводящих магнитов — далеко не простое дело. Одной из серьезных и неожиданных трудностей, с которой пришлось встретиться создателям сверхпроводящих магнитов, явилась так называемая проблема *деградации* проволоки в соленоидах. Оказалось, что значения критических токов, полученные на коротких образцах (кусочках проволоки), не воспроизводятся на длинных. В результате соленоиды, рассчитанные на одно поле, дают в действительности другое, значительно более низкое. Уже при силе тока почти в два раза меньшей ожидаемых критических значений начинаются скачки магнитного потока, которые могут привести к разогреву, а затем и к преждевременному переходу некоторых участков проволоки в нормальное состояние. И сразу согласно закону Джоуля — Ленца теплота будет выделяться пропорционально квадрату силы тока. Мгновенно нагреются соседние участки проволоки, развернется лавинный процесс исчезновения сверхпроводимости, и нормальная зона распространится по всей обмотке. При этом энергия, запасенная в магнитном поле, перейдет в теплоту, гелий начнет быстро испаряться, давление в сосуде (криостате), где помещается соленоид, возрастет и может произойти взрыв. Как же быть?

Можно, конечно, работать и при пониженных токах, а для достижения требуемых магнитных полей увеличить объем и массу катушки. На первых порах так и поступали. Но это экономически невыгодно. Так что пришлось искать новые пути. Оказалось, что уменьшению деградации способствует, например, покрытие сверхпроводящей проволоки каким-нибудь низкоомным нормальным металлом. С этой целью пучок тончайших сверхпроводящих проволок впрессовывается в медь или алюминий. В такой

системе эффект деградации практически отсутствует. Если в какой-либо точке обмотки сверхпроводник перейдет в нормальное состояние, то ток по низкоомному покрытию обойдет эту зону. Тепло быстро рассеется, и сверхпроводящее состояние восстановится.

Правда, на деле все не так уж просто. На стабильность, как выяснилось, влияют не только свойства самих сверхпроводников, но и в значительной степени условия теплоотвода и механическая прочность обмоток. Даже незначительный сдвиг проводников в результате удара или действия магнитных сил может вызвать сильный эффект деградации. Поэтому сверхпроводящие соленоиды, в особенности большие, необходимо снабжать защитными устройствами для быстрого отвода запасенной энергии и автоматического отключения тока в сверхпроводящей цепи.

Вот с какими трудностями пришлось встретиться создателям сверхпроводящих магнитов. Сильные поля сверхпроводимость добывала нелегким трудом. Множество проблем пришлось решать заново. Создавать проводники, затем конструировать из них провода особой структуры и формы. И даже «доставка» тока от генератора в криостат с гелием превратилась в проблему, решить которую было не просто. Пришлось создавать такие устройства, которые генерировали бы большие токи не вне, а внутри криостата.

Сегодня мало кто сомневается в будущем сверхпроводящих магнитов. Пора «детских болезней» кончилась, и «наступление» идет полным ходом. Поля в 10—15 Тл, создаваемые сверхпроводящими соленоидами в объемах от 1 до 10 $см^3$, стали доступны большинству физических лабораторий. Речь идет уже о крупных сверхпроводящих магнитных системах с рабочей зоной (диаметром), измеряемой метрами, и индукцией магнитного поля до 5 Тл.

А физики составляют новые проекты. На очереди гиганты с индукцией магнитного поля в 25—30 Тл.

Сверхсильные магнитные поля. Импульсные соленоиды. Мы уже говорили о том, что основные проблемы, стоящие на пути получения сверхсильных магнитных полей, — это проблема прочности и проблема теплоотвода. Достигаемые значения индукции поля ограничивают нагрев соленоида и его механическое разрушение.

Однако и разогрев до плавления, и разрушение не происходят мгновенно. Любая обмотка обладает тепло-

вой инерцией. Она не может мгновенно нагреться до температуры плавления даже под влиянием тока большей силы. Поэтому в течение малого промежутка времени по соленоиду можно пропускать ток большой силы. В таком импульсном режиме могут быть получены гораздо большие магнитные поля, чем при работе в стационарном.

Идею получения импульсных магнитных полей в 1923 г. впервые выдвинул и осуществил замечательный советский физик П. Л. Капица. В ряде работ, ставших классическими, Капица получил импульсное магнитное поле индукцией 50 Тл и провел обширные исследования ряда явлений в полях индукцией до 32 Тл.

Уже первые опыты П. Л. Капицы показали, что в обычных катушках с проводом из меди или более прочных сплавов можно на короткое время устойчиво получать магнитные поля индукцией 30—35 Тл. Более прочными в механическом отношении оказались соленоиды биттеровского типа, изготовленные из медных дисков. Такие соленоиды выдерживали магнитные поля индукцией 50—70 Тл. Но и это не предел. Создавая в массивном витке из бериллиевой бронзы поистине грандиозную мощность 1000 МВт с помощью конденсаторных батарей, удалось получить магнитное поле индукцией более 100 Тл.

Действуя подобным образом, вообще говоря, можно шагнуть и в область совсем уже фантастических полей. Но вот беда: усилия, развивающиеся в магнитных полях порядка 100 Тл, оказались столь велики, что ни один металл не в состоянии их выдержать без разрушения. Выходит, предел — 100 Тл? По-видимому, да. Во всяком случае, пока не будут получены более прочные и тугоплавкие металлы.

Впрочем, выход все-таки есть. Это «бессиловые» обмотки, о которых нам уже приходилось говорить. Физики возлагают на них большие надежды.

Магнитная накачка. По этому способу сильные магнитные поля создают путем «концентрации» (накачки) магнитного потока. Магнитный поток, созданный соленоидом, «загоняется» в небольшую полость и достигает в ней высокой плотности. Рабочая зона магнита резко сокращается — поле резко возрастает.

Таким образом, можно регулировать магнитный поток, меняя его геометрию. Сократить, например, сечение потока, вдвигая во внутреннюю полость соленоида ме-

таллический поршень. Первое время так и делали. Однако вскоре выяснилось, что, поместив внутри соленоида вкладыш — полый медный цилиндр, можно также добиться *эффекта концентрации потока*. При импульсе магнитного поля в соленоиде со вкладышем наводятся вихревые токи, которые вытесняют магнитный поток к центральному отверстию цилиндра.

Однако индуцированные токи угасают очень быстро. В обычных соленоидах всплеск поля до 45 Тл длится всего лишь доли секунды — магнитное поле как бы улетучивается из цилиндра. Иное дело — сверхпроводящие соленоиды. Благодаря диамагнетизму возрастающее поле здесь могло сохраниться сколь угодно долго.

Схематически принцип действия такого концентратора показан на рисунке 51. Первоначально магнитное поле создается внутри полого сверхпроводящего цилиндра. Отверстие в цилиндре имеет в сечении форму восьмерки, одна петля которой значительно больше другой. После того как внутри полого цилиндра создается магнитное поле, в широкое отверстие, заполняя его, вводится сплошной сверхпроводящий стержень. Поскольку сверхпроводник является для линий магнитной индукции непреодолимой преградой, то они выталкиваются из большого отверстия в меньшее, создавая на этом участке более концентрированное поле, которое может сохраняться в течение произвольного промежутка времени.

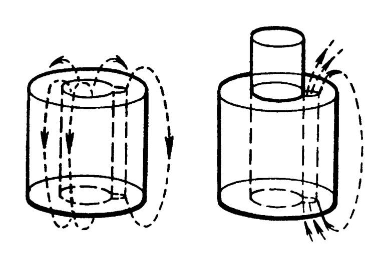


Рис 51

Казалось бы, с помощью сверхпроводящих соленоидов-накопителей можно получить очень сильные поля. К сожалению, это не так. Возникающее поле, как вы уже знаете, ограничено некоторым критическим значением $B_к$. Так что сверхсильные поля им пока не под силу.

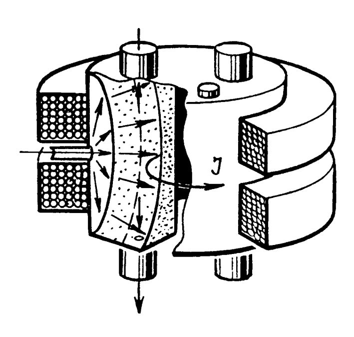


Рис. 52

Гидромагнит. Концентра-

цию магнитного потока можно осуществить с помощью проводящей жидкости. Оригинальный прибор, основанный на этой идее, показан на рисунке 52.

Соленоид, названный гидромагнитом, состоит из двух соосных труб, между которыми пропускается в радиальном направлении какая-нибудь хорошо проводящая жидкость, например жидкий натрий или жидкое серебро. Гидромагнит снабжен обмоткой возбуждения, создающей продольное магнитное поле.

Движущаяся жидкость пересекает линии магнитной индукции, и под действием ЭДС индукции в ней возникает ток. Таким образом, жидкость становится как бы обмоткой соленоида, создающей дополнительное магнитное поле, совпадающее по направлению с магнитным полем обмотки возбуждения. В результате в рабочем объеме гидромагнита возникает поле, индукция которого зависит от скорости движения жидкости и поля возбуждения. В такой системе, как показывают расчеты, могут быть получены поля индукцией более 100 Тл. Однако следует еще раз напомнить, что соленоид просто не в состоянии противостоять тем громадным усилиям, которые развиваются в таких полях.

И наконец, взрыв. Рассматривая процесс концентрации магнитного потока, физики обратили внимание на одно любопытное обстоятельство. Оказалось, что эффект концентрации существенно зависит от скорости, с которой происходит «схлопывание» рабочей зоны. Отсюда вывод: объем, в котором первоначально создано сильное магнитное поле, необходимо «захлопнуть» как можно быстрее.

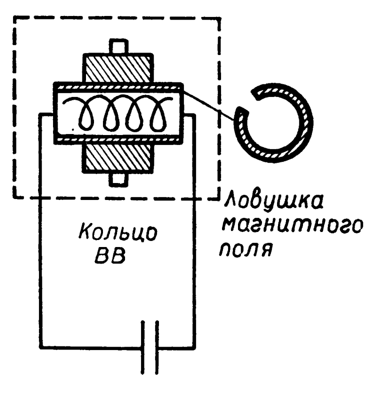


Рис. 53

По идее, конечно, просто. Но сделать это не так легко. Представляете, какие нужны усилия, чтобы сжать массивный металлический виток диаметром в несколько сантиметров до нескольких миллиметров, причем за ничтожно малое время — миллионные доли секунды. Не удивительно, что обычные способы не решают этой проблемы. Нужен взрыв.

Сжимая массивный виток с помощью направленного взрыва, можно добиться того, что плотность линий индукции, а значит и магнитное поле, в суженном витке сильно возрастет. Такая попытка была предпринята советскими и американскими физиками, и она увенчалась блестящим успехом. В процессе «схлопывания» удалось получить магнитное поле порядка 1000 Тл (!). Представление об этом уникальном эксперименте дает рисунок 53

Первоначальное магнитное поле создается импульсным соленоидом, на который разряжается батарея конденсаторов. Соленоид помещен в металлическую трубу (ловушку), снабженную разрезом и окруженную кольцом взрывчатого вещества.

При разряде конденсаторов на соленоид в трубе возникает магнитный поток, который благодаря разрезу свободно проникает через ее стенки. В момент, когда магнитный поток приближается к максимальному значению, происходит взрыв. Металлический цилиндр сжимается, и щель в нем захлопывается. При дальнейшем сжатии магнитный поток «замораживается» внутри цилиндра. Весь процесс взрыва и сжатия проводящей оболочки фиксируется на пленке с помощью сверхскоростной кинокамеры.

Теоретически в методе взрыва не существует предельного значения достижимого магнитного поля. Чтобы превысить достигнутые результаты, нужно увеличить объем, занимаемый начальным магнитным полем, и уменьшить его индукцию.

Уже сейчас физики говорят о полях порядка 10^4 Тл и более. Такие невообразимые поля и давления, создаваемые ими, существуют лишь разве внутри звезд. Представляете, сколько необычайно важных сведений могут получить ученые, если бы им удалось хоть на ничтожно малый срок заглянуть в недра сверхзвезд.

Фантастика? Пока — да. Но со временем все это, очевидно, станет реальностью. Наука и техника никогда не стоят на месте. И можно не сомневаться, что каждый существенный шаг в этом направлении будет одновременно и шагом к более полному ответу на основной вопрос физики: как устроено вещество.

МАГНИТ УПРАВЛЯЕТ

Жезлом
правит,
чтоб вправо
шел.
Пойду
направо.
Очень хорошо.

В Маяковский

Многие задачи в современной физике были решены (и продолжают решаться) с помощью магнитов. Сегодня почти в каждой физической лаборатории имеется магнит. С его помощью физики изучают свойства вещества и испытывают новые материалы, сортируют изотопы атомов и определяют их основные характеристики, фокусируют пучки заряженных частиц и удерживают внутри ускорителя сотни миллиардов ядерных снарядов, скорость которых почти достигает скорости света...

И принципы и конструкции этих приборов самые различные. Но одна черта роднит их. Всюду использованы одни и те же явления. Ток рождает магнитное поле — магнитное поле воздействует на электрический заряд.

Это лежит в основе. С действием магнитного поля на движущиеся электрические заряды мы познакомились еще в начале нашего рассказа о природе магнита. Тогда мы выяснили, что на любую заряженную частицу, движущуюся в магнитном поле, действует сила Лоренца. Эта сила всегда перпендикулярна скорости частицы и магнитному полю. Ее модуль

$$|\vec{F}_м| = q\,|\vec{v}|\,|\vec{B}|\sin\alpha,$$

где q — заряд частицы, $\vec{v}$ — ее скорость, $\vec{B}$ — индукция магнитного поля и α — угол между векторами $\vec{v}$ и $\vec{B}$ (см. рис. 5).

Силу Лоренца легко можно продемонстрировать Вспомните опыт с электроннолучевой трубкой и магнитом. Это и есть та сила, которая искривляет путь потока электронов и преобразует прямолинейную траекторию в криволинейную.

Это последнее обстоятельство чрезвычайно существенно и заслуживает того, чтобы поговорить о нем подробнее.

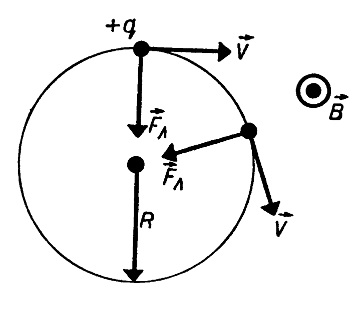


Рис. 54

Об особенностях движения заряженных частиц в магнитном поле. Начнем с задачи (очень известной), когда в однородное магнитное поле $\vec{B}$ влетает заряд q, имеющий массу m; вектор его скорости $\vec{v}$ перпендикулярен вектору индукции магнитного поля (рис. 54). Каким будет дальнейшее движение заряда?

Сила Лоренца, действующая на заряд, в любой момент перпендикулярна его скорости; следовательно, она не в состоянии изменить модуль скорости, но может изменить ее направление. В результате заряд, получив центростремительное ускорение, будет двигаться по *окружности*, радиус которой находится из уравнения

$$F_м = F_ц: \ \frac{mv^2}{R} = qvB, \ R = \frac{m}{q} \frac{v}{B}.$$

Естественно, чем сильнее поле, тем меньше становится радиус вращения, чем больше скорость заряда, тем больше и радиус. Когда поле стремится к нулю, радиус стремится к бесконечности, т. е. заряд движется по прямой, как и должно быть.

Рассмотрим теперь более общий случай, когда скорость заряда $\vec{v}$ направлена под произвольным углом к вектору индукции магнитного поля. Если заряд влетает в однородное магнитное поле под углом α к линиям магнитной индукции (рис. 55), то составляющая скорости

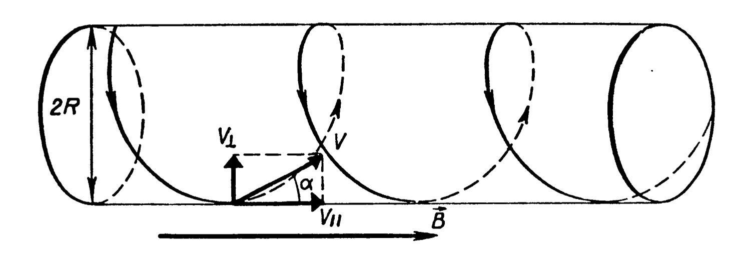


Рис. 55

$\vec{v}_{\parallel}$, параллельная вектору $\vec{B}$, меняться не будет, а под действием силы Лоренца, зависящей от нормальной составляющей $\vec{v}_{\perp}$, заряд будет описывать в плоскости, перпендикулярной $\vec{B}$, окружность. Эту окружность часто называют *ларморовской орбитой*, а радиус $R = \frac{mv_{\perp}}{qB}$ — *ларморовским.*

Вращаясь по окружности в плоскости, перпендикулярной к магнитному полю, заряд вместе с тем будет двигаться равномерно вдоль линий поля, так что его траектория будет представлять собой винтовую линию.

Обратите внимание на характерную особенность магнитного поля — оно только изменяет траекторию движения заряда, а скорость заряда остается неизменной. Магнитное поле работы над зарядом не совершает. Сила Лоренца, действующая на заряд, в любой момент перпендикулярна его скорости, следовательно, она не в состоянии изменить модуль скорости — и кинетическая энергия частицы будет оставаться постоянной. Это значит, что при движении заряда в постоянном магнитном поле энергия от поля не отбирается.

Все сказанное относится к однородному магнитному полю. В случае неоднородного поля сила уже не будет оставаться постоянной от точки к точке при заданной скорости и направлении движения заряда, поэтому траектории заряда будут сложнее.

Создать неоднородное магнитное поле совсем нетрудно. Скажем, можно полюсам магнита придать изогнутую форму. Тогда ход силовых линий индукции будет, например, таким, как показано на рисунке 56.

Заряд, попавший в неоднородное магнитное поле, совершает в нем сложное движение. Он сравнительно быстро вращается вокруг линии поля и более медленно движется вдоль нее. При этом орбита уже не будет окружностью, а возникнет «дрейф».

В однородном магнитном поле сила Лоренца действует на заряд строго по радиусу окружности и не может изменить продольную компоненту скорости. В нарастающем поле, где линии индукции сгущаются, у силы Лоренца появляется составляющая F, которая направлена перпендикулярно плоскости ларморовской окружности. Именно эта составляющая тормозит движение заряда в область более сильного магнитного поля. Поэтому если орбита в целом первоначально смещается в сторону сгущения линий поля (на рис. 56 — *влево*), то это движение

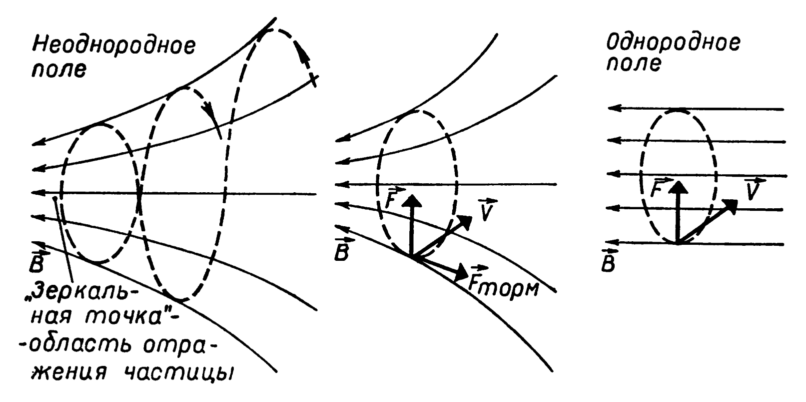


Рис. 56

будет замедленным, в то время как кинетическая энергия вращения и скорость будут возрастать. В какой-то точке движение орбиты прекратится, а так как сила Лоренца продолжает действовать в том же направлении, то начнется ускоренное движение *вправо*, т. е. в область более слабого поля.

Именно такой эффект проявляется в магнитном поле Земли, захватывающей заряженные частицы, приходящие из космоса, в частности от Солнца. Этот же эффект используется для удержания заряженных частиц в ограниченной области пространства, что весьма важно, например, для осуществления термоядерных реакций.

Однако не будем забегать вперед. Тот факт, что сила Лоренца всегда перпендикулярна скорости движения заряженной частицы, находит широкое практическое применение. Вот некоторые примеры.

Линзы могут быть и магнитными. Здесь мы покажем, как с помощью магнитного поля решается задача фокусировки пучка заряженных частиц.

Фокусировка частиц имеет множество применений. Например, в телевизионной трубке электроны, вылетающие из катода, фокусируются на экране в маленькое пятнышко. Но для того чтобы направить все электроны в одну точку экрана, необходимо собрать их в тонкий луч. Это стремление в свое время доставило создателям телевидения немало хлопот.

Дело в том, что любой электронный луч стремится разойтись, расфокусироваться из-за электрического (кулоновского) расталкивания одноименно заряженных

электронов. Правда, расталкиванию препятствуют силы собственного магнитного притяжения движущихся в одном направлении электронов. Эти силы стремятся сжать луч, и действие их станет понятным, если вспомнить, что два проводника с токами одного направления взаимно притягиваются из-за взаимодействия их магнитных полей.

Однако даже у пучка электронов, движущихся с околосветовой скоростью, полной компенсации действия обоих процессов нет, и пучок постепенно расходится. Чем ближе к экрану, тем дальше электроны отталкивают друг друга. В результате луч «разбухает», и если бы он упал на экран в таком виде, то на экране образовалось бы размазанное пятно. Пытаться таким «лохматым» лучом нарисовать четкое изображение невозможно.

Но веер электронных пучков можно сжать. Как это сделать? Вспомните, как подобные задачи решаются в оптике. На пути луча ставится обычная оптическая линза, которая фокусирует луч таким образом, чтобы фокус попал как раз на экран.

Оказывается, электроны тоже можно нацеливать на экран, поставив на их пути линзы, только не оптические, а *магнитные*. Магнит помогает побороть «своенравие» электронов и не дает пучку сбиться с пути.

Магнитная линза, направляющая луч, — устройство несложное. В простейшем случае это катушка, насаженная на горловину трубки, которая создает магнитное поле, направленное вдоль оси трубки. Для электрона, летящего вдоль линии индукции магнитного поля, поле не помеха. Но стоит ему лишь сбиться с пути и отклониться от курса, как он попадает под воздействие магнитного поля. Теперь уже со всех сторон на электрон действуют силы. Летящие рядом соседи стремятся оттолкнуть его от оси. Анод электронной трубки продолжает тянуть его к экрану, а магнитное поле линзы заставляет описывать круг. Электронам ничего не остается делать, как лететь к экрану, но уже не по прямой, а виражами, совершая виток за витком. С каждым витком магнитные силы закручивают электрон сильнее — витки сгущаются и становятся меньше (рис. 57). Так гонимые полем электроны прижимаются к оси и попадают в одну и ту же точку экрана, образуя маленькое светящееся пятно.

Как увидеть молекулу. Сфокусированный электронный луч оказывается прекрасным исследовательским ин-

струментом. Он позволяет решать задачу огромной важности: рассматривать в мельчайших подробностях микрообъекты. В микроскоп, в котором изображение создается электронами, можно «увидеть» предметы, недоступные для «зрения» оптического микроскопа.

Электронные микроскопы строят по схемам, очень похожим на схемы оптических микроскопов, но вместо линз из стекла используют магнитные линзы. Схематически они изображены на рисунке 58. Цилиндрически симметричный магнит с острыми кольцевыми наконечниками полюсов создает в малой области очень сильное магнитное поле. Он фокусирует электроны, летящие через эту область. На рисунке видно, как расходящиеся электроны собираются в параллельный пучок.

Если теперь на пути поставить еще одну такую линзу, то она сфокусировала бы электроны снова в одну точку и получилось бы изображение источника.

Современные электронные микроскопы весьма совершенны. Отработаны их «оптические» схемы, конструкция линз; предусмотрено много приспособлений, облегчающих изготовление и установку исследуемых объектов. Электронные микроскопы позволяют разглядеть

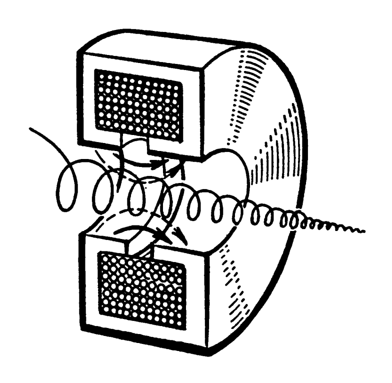


Рис. 57

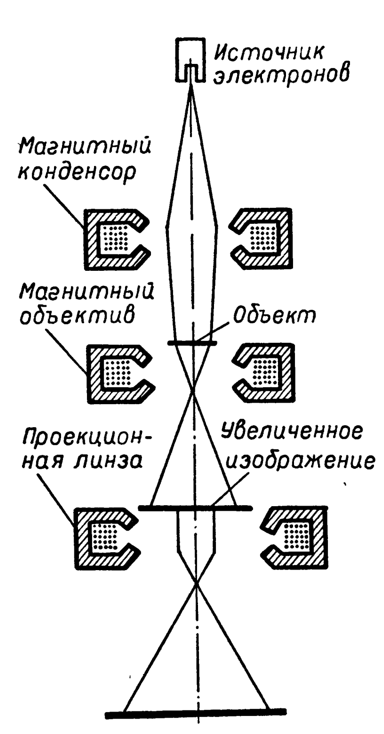


Рис. 58

детали размером в несколько ангстрем (1 ангстрем $= 10^{-7}$ мм), а это уже очень близко к теоретическому пределу. Такие микроскопы дают увеличение в 100000—150000 раз, в то время как оптический микроскоп увеличивает в 2000 раз. Целые каскады сенсационных открытий в биологии, химии, физике, металлургии и других областях науки и техники были сделаны с помощью электронного микроскопа.

Машины для сортировки атомов. Особенности движения заряженных частиц в магнитных полях позволили разработать весьма точные методы определения масс этих частиц.

Конечно, проще было бы, например, взвешивать частицу. Но такие весы пока не придумали, а главное, чтобы взвесить частицу, надо ее остановить. А как это сделать? Поэтому массу частицы приходится определять на лету, по крутизне ее разворота в магнитном поле. Ведь отклонение заряженных частиц в магнитном поле зависит только от отношения заряда частицы к ее массе, т. е. от удельного заряда q/m. Значит, если пропустить пучок заряженных частиц, например положительных ионов, через магнитное поле перпендикулярно линиям индукции, то на экране частицы, обладающие одинаковыми скоростями, но разными отношениями заряда к массе, попадут в разные точки. Каждый тип атомов дает свои метки, и мы можем даже оценить пропорции составляющих вещество атомов по плотности меток.

По аналогии с оптикой изображение, получаемое на экране, называют *спектром*. Это подсказывает подходящее название прибора, который дает развернутую запись масс атомов, — *масс-спектрограф*. Оптический спектрограф дает спектр длин волн светового потока, масс-спектрограф — распределение частиц по массам, т. е. спектр масс пучка частиц.

Рассмотрим систему, показанную на рисунке 59. Это масс-спектрограф с двойной фокусировкой. Основа прибора — вакуумная камера, помещенная в магнитное поле. В нее через узкую входную щель влетают исследуемые ионы. Получить положительные ионы можно за счет ионизации атомов при газовом разряде. Для этого катод газоразрядной трубки делают в виде диска с отверстиями. Образующиеся при разряде ионы, ускоряясь полем катода, проникают через отверстия, имеющиеся в катоде, образуя пучки так называемых каналовых лучей.

В пролетной камере, конденсаторе, ускоренный пучок ионов попадает под действие скрещенных электрического и магнитного полей, каждое из которых отклоняет ионы в противоположные стороны.

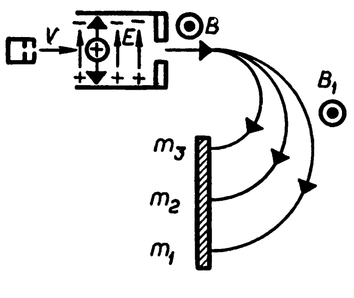


Рис. 59

На заряд q, летящий со скоростью $\vec{v}$, в электрическом поле $\vec{E}$ действует сила $\vec{F}_e = q\vec{E}$, а в магнитном — сила Лоренца $\vec{F}_м = q(\vec{v} \times \vec{B})$. Пройти по всему каналу и успешно достигнуть цели смогут только те ионы, для которых действия электрического и магнитного полей взаимно погашаются. Подбором полей можно добиться того, что в области, где они скрещиваются, $F_e = F_м$, т. е. $qE = qvB$ и $v = \frac{E}{B}$. Как видите, скорости вышедших из канала ионов независимо от их массы и зарядов будут одинаковы и равны E/B. Поэтому такие частицы пролетают без отклонения и попадают в область однородного магнитного поля с индукцией $\vec{B}_1$, направленной перпендикулярно скорости $\vec{v}$. В этом поле ионы движутся по окружности, радиусы которых зависят от удельного заряда q/m и равны $R = \frac{m}{q}\frac{v}{B_1} = \frac{m}{q}\frac{E}{BB_1}$.

Так как R, B_1, v могут быть измерены на опыте, то удается определить отношение заряда частицы к ее массе. Именно так для медленно движущихся электронов было найдено, что $q/m = 1{,}7588 \cdot 10^{11}$ Кл/кг, откуда для массы покоя электрона получилось: $m_e = 9{,}1095 \cdot 10^{-31}$ кг, что в 1836 раз меньше массы протона, определенной таким же методом.

Масс-спектрограф сыграл важную роль в развитии атомной и ядерной физики. Он позволил обнаружить существование изотопов различных элементов и определить массы их атомов. Оказалось, что представители одного и того же порядкового номера периодической системы элементов Менделеева могут иметь неодинаковую массу, что каждый химический элемент природа создала в нескольких вариантах. Эти варианты химических элементов назвали *изотопами* (от греческих слов «изос» — одинаковый и «топос» — место). Изотопы —

это атомы одного и того же элемента, в ядрах которых содержится одинаковое число протонов, но разное число нейтронов.

Но нейтроны — это тяжелые частицы, такие же примерно, как протоны. Следовательно, массы ядер изотопов разные и их траектории при движении в магнитном поле тоже различны. В вакуумной камере под действием магнитного поля они двигаются по орбитам, соответствующим их массам. И если взвешиваемые атомы состоят из смеси изотопов, то на фотопластинке, поставленной на их пути, можно наблюдать почернения в тех местах, где на нее попадают частицы разной массы. Число пятнышек соответствует числу изотопов. А абсолютный вес атомов каждого изотопа можно найти, зная положение соответствующего пятнышка на фотопластинке. В сильном магнитном поле могут быть разделены даже очень «похожие» изотопы-близнецы. Так физикам удалось исследовать почти все химические элементы.

Что такое эффект Холла? В масс-спектрографе заряженные частицы движутся в вакууме, и поэтому отклонение их магнитным полем является прямым и легко наблюдаемым результатом действия сил Лоренца. Ну, а если частицы движутся в проводнике, расположенном в магнитном поле? Как тогда проявляется действие магнитных сил?

Оказывается, если проводник с током поместить в магнитное поле, то в нем возникает ряд эффектов: уменьшается его электропроводность и теплопроводность; в направлении, перпендикулярном полю и току, возникает разность потенциалов и температур. Каждое из этих явлений имеет свое название (большей частью связанное с именем открывшего его ученого), и все вместе они называются гальваномагнитными явлениями.

Наиболее простым и важным из гальваномагнитных эффектов является эффект, открытый в конце прошлого века американским физиком Холлом. Это явление уже давно и широко применяется физиками для исследования электрических свойств твердого тела и за последнее время нашло ряд важных применений в технике.

Обратимся к рисунку 60, который поможет нам пояснить суть дела. Предположим, что по проводнику, имеющему форму прямоугольной пластины, протекает электрический ток I. В отсутствие магнитного поля разность потенциалов между точками A и B, расположенными на

противоположных гранях пластины, равна нулю. Если же образец поместить в магнитное поле, перпендикулярное направлению тока и плоскости пластины, то между точками A и B возникает разность потенциалов, называемая холловской ЭДС.

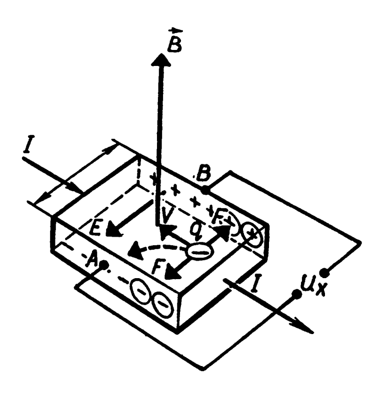


Рис. 60

Совсем нетрудно понять причину этого. Ведь электрический ток есть упорядоченное движение электронов или других зарядов, которые образуют результирующее течение или поток. На каждый такой заряд со стороны магнитного поля действует сила Лоренца. Под влиянием этой силы электроны (направление их движения указано на рисунке 60 стрелками) будут отклоняться на боковую грань образца. Но так как они не могут исчезнуть с этой грани, они просто скапливаются там. В результате на одной грани образуется избыток отрицательных зарядов, а на другой, противоположной — их недостаток. Другими словами, в проводнике создается *поперечное электрическое поле* E и возникает *поперечная разность потенциалов* $U_х$.

Движение электронов поперек проводника будет происходить до тех пор, пока возникшее электрическое поле не скомпенсирует действие силы Лоренца:

$$F_e = F_м \text{ или } eE = evB$$

(здесь e — заряд электрона, v — средняя скорость упорядоченного движения электронов).

Отсюда нетрудно найти напряженность электрического поля и поперечную разность потенциалов:

$$E = vB, \quad U_x = Eh = vBh,$$

где h — ширина пластинки.

С другой стороны, средняя скорость v связана с силой тока в проводнике:

$$I = envS \text{ или } v = \frac{I}{enS},$$

где n — число свободных электронов в единичном объеме проводника, S — площадь поперечного сечения пластины.

Тогда окончательно для разности потенциалов U_x получим:

$$U_x = vBh = h / enS \cdot IB.$$

Заметьте, что если ток в образце был бы обусловлен движением положительных зарядов, то возникло бы поперечное поле противоположного направления. Таким образом, по знаку холловской разности потенциалов можно определить знак носителей заряда, а стало быть, и тип проводимости вещества.

По существу это один из основных методов изучения электрических свойств таких материалов, как полупроводники, которые играют фундаментальную роль в развитии современной техники. Дело в том, что в отличие от металлов, в которых носителями тока являются свободные электроны, в полупроводниках носители тока могут обладать как отрицательным, так и положительным зарядом. Измерив ЭДС Холла, можно установить тип проводимости полупроводника и определить концентрацию носителей. Если при этом одновременно измеряется и электропроводность, можно, кроме того, вычислить и такую важную характеристику, как подвижность носителей тока.

«Атомная артиллерия». Трудно найти в наши дни человека, который не знал бы об ускорителях. С их помощью физики осуществляют столкновения и другие взаимодействия атомных частиц и, изучая эти процессы шаг за шагом, проникают в таинственный пока еще микромир.

Основной характеристикой таких устройств обычно принято считать предельную энергию, до которой разгоняются «атомные снаряды» — ионизованные атомы, электроны, протоны. Именно энергия, и только она, та питательная среда, в которой на мгновение расцветают необычайные «миражи» микромира. Чем выше энергия «снарядов», бомбардирующих атомы мишени, тем выше «зоркость» (или, как говорят физики, разрешающая способность) ускорителя, тем более мелкие детали микромира можно обнаружить и изучить с его помощью.

Однако ускорители предназначены не только для исследования, но и для «производства» микрочастиц. Сталкиваясь с ядрами атомов мишени, высокоэнергичные «атомные снаряды» могут откалывать от них большие куски ядерного вещества, дробить ядра, а при определенных условиях, наоборот, могут сливаться с ядрами ми-

шени или «вгонять» большие куски ядерного вещества один в другой, образуя новые, более массивные частицы.

Образно говоря, ускорители заряженных частиц представляют собой уникальное устройство, с помощью которого можно «конструировать» и изучать свойства новых атомных частиц, неизвестных еще ядерных систем и различных процессов, связанных с ними.

Как получают частицы высоких энергий. Для исследования строения атома Резерфорду было достаточно энергии альфа-частиц, рождающихся при естественном радиоактивном распаде. Однако дальнейшее проникновение в глубины материи потребовало более высоких энергий. Их дали ускорители, способные разгонять частицы, придавать им энергию.

Но что значит разогнать частицу-снаряд до необходимой энергии? Это значит увеличить ее скорость. Иными словами, частице необходимо сообщить ускорение, т. е. на нее в течение некоторого времени должна действовать сила. Такую силу можно легко вызвать, поместив заряженную частицу во внешнее постоянное или переменное электрическое поле.

Любая частица, попавшая в электрическое поле, движется прямолинейно от одного электрода к противоположно заряженному. Скорость ее движения определяется разностью потенциалов между электродами. Если поместить, например, электрон в электрическое поле с разностью потенциалов 1 В, то, проходя это поле, он приобретает энергию 1 эВ (*электрон-вольт*). Увеличивая разность потенциалов, увеличиваем энергию частицы. Так, при разности потенциалов 1 млн. В электрон приобретает энергию 1 млн. эВ, или 1 МэВ.

Но вот что любопытно. Оказывается, такую же энергию 1 МэВ электрон приобретает, пройдя миллион раз через поле разностью потенциалов 1 В. Значит, если заставить частицу проходить пусть даже небольшую разность потенциалов, но много раз, можно сильно увеличить ее энергию, имея источник напряжения всего в десятки тысяч вольт и меньше. Идея многократного ускорения частиц сравнительно небольшим напряжением лежит в основе большинства современных ускорителей. Частицы либо движутся по прямой, проходя в процессе ускорения каждый ускоряющий промежуток один раз (*линейные ускорители*), либо они движутся по окруж-

ности или спирали, проходя одни и те же ускоряющие промежутки много раз (*циклические ускорители*).

Линейные ускорители могут разогнать любые частицы до околосветовых скоростей, т. е. до любых энергий. Однако большое число ускоряющих электродов и значительная их длина существенно ограничивают использование таких систем для ускорения частиц до высоких энергий.

Иное дело — циклические ускорители. Здесь частицы совершают сотни, тысячи и даже сотни тысяч оборотов. Их можно разгонять, периодически создавая в определенных участках траектории электрическое поле. А как заставить частицы «бегать» по кругу?

В принципе ответ ясен. Необходимо приложить магнитное поле, перпендикулярное направлению движения частиц. Попав в магнитное поле, они под действием силы Лоренца начнут двигаться по окружности. Поэтому главной составной частью любого циклического ускорителя является магнит. Его назначение — удерживать движущиеся частицы на круговых орбитах, чтобы к ним можно было снова и снова приложить ускоряющие силы.

Циклотрон. Первый циклический ускоритель — циклотрон был разработан и создан американским физиком Лоуренсом в 1931 г. Схематически принцип действия этого устройства показан на рисунке 61.

Посреди зазора между полюсами магнита, создающего постоянное магнитное поле, находится откачанная до высокого вакуума плоская коробка, в которой ускоряются частицы. Это камера циклотрона. В ней находится источник заряженных частиц, например протонов массой m и зарядом q. Камера состоит из двух полых металлических половинок электродов, называемых из-за их D-образной формы дуантами. К этим электродам (*дуантам*) приложено переменное напряжение, которое меняет направление всякий раз, когда частицы делают пол-оборота. Благодаря этому электрическое поле в

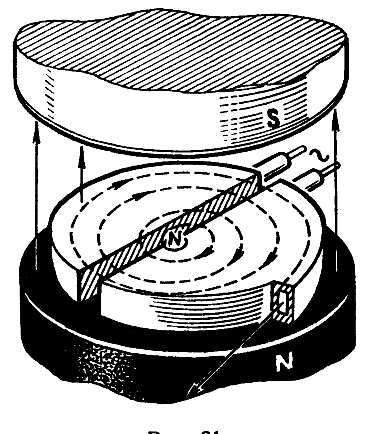


Рис. 61

зазоре между дуантами всегда направлено так, что ускоряет частицы.

Каждый раз, когда частица, движущаяся в магнитном поле по окружности, подлетает к зазору между дуантами, она в такт с изменением электрического поля получает ускоряющий «шлепок». В результате энергия частицы увеличивается, и она, двигаясь все быстрее и быстрее, вращается по кривой типа раскручивающейся спирали.

Разумеется, электрическое поле в зазоре в зависимости от его направления может либо ускорять, либо тормозить заряды. Очевидно, нужно подобрать такую частоту генератора, чтобы максимум напряжения в промежутке между дуантами приходился всякий раз на момент нахождения там частицы. Но как быть тогда с последующим движением протона, когда он начнет описывать все большие и большие полуокружности? Будет ли он успевать теперь за периодическими изменениями электрического поля?

Давайте прикинем. Если линейная скорость частицы v и радиус окружности, по которой она движется, R, то период одного оборота равен: $T=\frac{2\pi R}{v}$. В циклотроне на заряженную частицу действуют две силы: центробежная, которая стремится «выбросить» частицу из циклотрона, и сила Лоренца, которая заставляет частицу двигаться по окружности. Приравняв эти силы, найдем радиус окружности. Он равен: $R=\frac{mv}{qB}$. Отсюда следует, что время одного оборота — *период* $T=\frac{2\pi}{B}\frac{m}{q}$, т. е. *не зависит ни от скорости частицы, ни от радиуса ее траектории.* Если магнитное поле постоянное по всей области движения частицы, то и время движения частицы по полуокружности любого радиуса постоянно.

В этом основная причина простоты работы циклотрона. Генератор создает переменное напряжение фиксированной частоты, которое в регулярные промежутки времени сообщает частицам ускоряющие импульсы. Зная массу частицы m, ее заряд q и индукцию магнитного поля $\vec{B}$, нетрудно рассчитать энергию частицы, оказавшуюся в результате ускорения на расстоянии R от источника:

$$E = \frac{mv^2}{2} = \frac{q^2}{2m}(BR)^2.$$

Замечательно, что описанный способ позволяет повысить первоначальную энергию протона в сотни и даже тысячи раз (максимально до 20—25 МэВ), хотя напряжение на дуантах не превосходит нескольких десятков или сотен киловольт. Вы спросите, почему только до 25 МэВ, а не до 1000 МэВ или еще более высокой энергии? Ведь можно увеличить индукцию магнитного поля или построить более крупный циклотрон.

Однако значительно повысить магнитное поле в циклотронах не удается. Максимально достижимое значение индукции лимитируется насыщением в железных полюсных наконечниках и составляет примерно 1,5—2 Тл. Что же касается габаритов ускорителя, то подсчитали, что один только магнит циклотрона на 10000 МэВ, при $B = 1{,}5$ Тл, весил бы более 1 млн. т (!).

Но это еще не все. Если даже построить крупный циклотрон, ожидая получить более высокие энергии, то окажется, что частицы энергией в несколько мегаэлектрон-вольт не успевают вовремя подлетать к ускоряющему промежутку. На внешних орбитах, где протоны должны были бы приобрести большую энергию, они движутся все медленнее и медленнее. В конце концов это приводит к нарушению синхронности между работой генератора и циркуляцией протонов (расфазировке); частицы выпадают из такта, и процесс ускорения прекращается. Почему же это происходит? Ведь если заряд частицы не изменился и не изменилось магнитное поле, то и время оборота частицы по любой орбите не должно меняться.

На самом деле это не совсем так. Период T не зависит от скорости частицы и радиуса орбиты только при скоростях, малых по сравнению со скоростью света. Когда же скорость частицы приближается к скорости света — физики называют такие частицы *релятивистскими*, масса ее в соответствии с неумолимой теорией относительности резко возрастает. Но частица большей массы менее подвижна — она начинает отставать и попадает в тормозящее поле. Как видите, сам принцип работы циклотрона не позволяет получать протоны энергией более 20—25 МэВ. Все попытки ускорить подобным способом заряженные частицы до больших энергий оказались безуспешными.

Выход из создавшегося положения был найден советским физиком В. И. Векслером. Он сумел составить такой график движения частицы, в котором автомати-

чески учитывается возрастание их массы. Вы, конечно, видели, как катится по лестнице мяч. Он вначале прыгает с одной ступеньки на другую, потом скорость его увеличивается, и он уже перепрыгивает через две ступеньки, потом через три, четыре и т. д. Нечто подобное Векслер предложил делать и в ускорителях. По мере роста скорости частиц изменять или индукцию магнитного поля или частоту генератора. Повинуясь влиянию поля изменяющейся частоты, частицы сами по себе приходят к ускоряющему промежутку как раз в тот момент, когда это необходимо. Таким образом, процесс ускорения может продолжаться и при очень высоких энергиях.

На этом принципе (физики назвали его автофазировкой) основано действие многих современных ускорителей. Но это уже не обычные циклотроны.

Синхроциклотроны, синхротроны и синхрофазотроны. Циклотрон, в котором по мере разгона частиц изменяется частота ускоряющего электрического поля, называется *синхроциклотроном* или *фазотроном*. В этом устройстве сгусток частиц на ранних стадиях их движения ускоряется периодически, как это было описано раньше. Затем генератор медленно уменьшает частоту электрического поля, что позволяет тяжелым, высокоэнергичным частицам вовремя проходить ускоряющий промежуток. Таким путем были получены частицы с энергией до 800 МэВ.

Частицы еще больших энергий физики получают в кольцевых ускорителях — *синхротронах* или *синхрофазотронах*. Синхротроны — это ускорители с переменным магнитным полем и постоянной частотой ускоряющего поля. В синхрофазотронах переменными являются как магнитное поле, так и частота ускоряющего поля.

Кольцевые ускорители — самые крупные и дорогостоящие физические приборы. Диаметр кольцевых магнитов таких ускорителей составляет километры; магнитная система обычно состоит из нескольких отдельных секторных магнитов, составляющих в плане кольцо. Между «челюстями» такого магнита, собранного из множества С-образных листов, тянется вакуумная камера (рис. 62). Частицы, которые должны ускоряться такими машинами, ионизуются и предварительно ускоряются до энергий в десятки тысяч электрон-вольт малыми ускорителями. Затем они инжектируются в кольцевую камеру и враща-

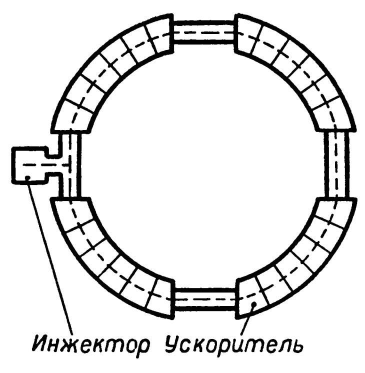


Рис. 62

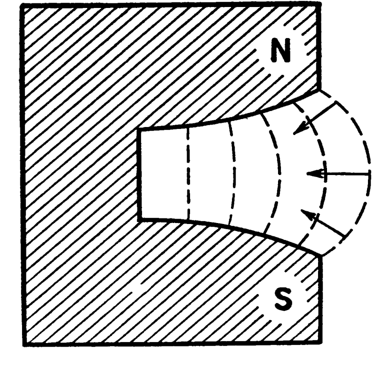


Рис. 63

ются внутри нее, приобретая после каждого оборота дополнительную энергию.

Современные циклические ускорители — необычайно сложные технические сооружения. Существенную роль играет даже состояние грунта, на котором они сооружаются. Создание ускорителей на десятки и сотни миллиардов электрон-вольт сталкиваются как с экономическими трудностями, так и с «барьером технической реализации». Достаточно сказать, что при диаметре ускорительного кольца синхрофазотрона в 1—2 км элементы его магнитной фокусировки должны быть изготовлены и смонтированы с точностью до десятых долей миллиметра. Это проблема, которую даже представить себе трудно. Невольно вспоминаешь о мастере, который был воспет в свое время Лесковым, за то, что сумел подковать блоху.

Но дело тут даже не в трудностях монтажа. Относительные отклонения значений магнитного поля от блока к блоку не должны превышать 10^{-4} (одной десятитысячной). Любое нарушение структуры магнитного поля и различного рода его возмущения приводят к «гибели» ускоренного пучка. Частицы попадают на стенки вакуумной камеры и перестают участвовать в дальнейшем процессе ускорения.

Значит, необходимо создать такую систему, которая была бы подобна обычной оптической линзе и могла фокусировать пучок частиц. Эту задачу решает сам магнит ускорителя. Для обеспечения вертикальной фокусировки полюсы магнита скашивают так, чтобы зазор к краю полюса становился больше. Образуется так называемое

бочкообразное поле, спадающее по направлению к внешнему радиусу (рис. 63). Стоит теперь частице вылететь из серединной плоскости, как она попадает под влияние магнитной силы Лоренца, заставляющей ее вернуться обратно.

Такую *фокусировку* называют *мягкой*. На этом принципе, в частности, работает синхрофазотрон Объединенного института ядерных исследований в Дубне, «производящий» протоны энергией до 10 000 МэВ. Масса его четырехсекторного кольцевого магнита радиусом 28 м составляет 36000 т. Надо сказать, что для установок подобного типа 10 000 МэВ это почти предел. При использовании мягкой фокусировки нельзя достичь больших значений энергии.

Можно, конечно, для получения протонов энергией порядка десятков тысяч мегаэлектрон-вольт сооружать такие ускорители, только больших размеров. Но чем больше радиус, тем труднее удержать частицы на равновесной орбите. Пучок стремится разойтись, расфокусироваться. Приходится увеличивать сечение вакуумной камеры, а стало быть, и размеры воздушного зазора (*апертуру*) магнита. Это обходится очень дорого. Подсчитали: масса ускорителя на 30 000 МэВ с мягкой фокусировкой составила бы 100 000 т.

Для существенного уменьшения массы магнита необходимо иметь возможность без заметного ущерба для интенсивности пучка уменьшить размеры воздушного зазора (апертуру) магнита. Такое уменьшение апертуры можно допустить только при условии, что будут значительно увеличены фокусирующие силы, удерживающие частицы в узкой кольцевой области между полюсами магнита. Именно такое увеличение фокусирующих сил и достигается в системах с *жесткой фокусировкой*.

Принцип жесткой фокусировки заключается в том, что каждый блок магнита сильно фокусирует частицы только в одной плоскости. При последовательном расположении блоков, в которых поле либо резко увеличивается, либо резко уменьшается (по направлению к центру кольца), пучок частиц подвергается фокусировке (рис. 64).

Такая система подобно чередующейся последовательности собирающих и рассеивающих линз в целом дает эффект «собирания» частиц. Если один блок фокусирует частицы в горизонтальной плоскости (и разбрасывает их

в вертикальной), то следующий блок, в котором направление спада поля меняется, фокусирует их в вертикальной, разбрасывая в горизонтальной. В результате сечение пучка и, следовательно, размеры рабочей зоны магнита становятся меньше, что позволяет увеличить энергию частиц без существенного утяжеления магнита. На этом принципе основано устройство многих современных ускорителей на высокие энергии. Один из крупнейших — протонный ускоритель Института физики высоких энергий в г. Серпухове.

Диаметр основного кольца ускорителя 470 м, а длина его составляет 1,5 км. 76 000 МэВ энергии набирают протоны, мчащиеся в его кольцевой камере размером 19,5×11,5 см. В таком узком коридоре, не касаясь его стенок, протоны за короткое время ускорения (~3 с) проходят путь более полумиллиона километров. И на всем этом пути магнит Серпуховской машины ведет ускоряемые протоны по узенькой кольцевой дорожке шириной 16 см. Отсюда и происходит выигрыш в массе самого магнита. 120 блоков, каждый длиной 11 м, весят «всего лишь» около 20 000 т.

Но даже такой уникальный инструмент уже не удовлетворяет физиков. Проектируются и строятся новые сверхмощные установки.

Растут энергии, растут размеры, растет и стоимость ускорителей. За последние десятилетия энергия ускорителей росла чуть ли не в геометрической прогрессии — от десятков миллионов электрон-вольт до десятков и даже сотен миллиардов электрон-вольт. Создание таких ги-

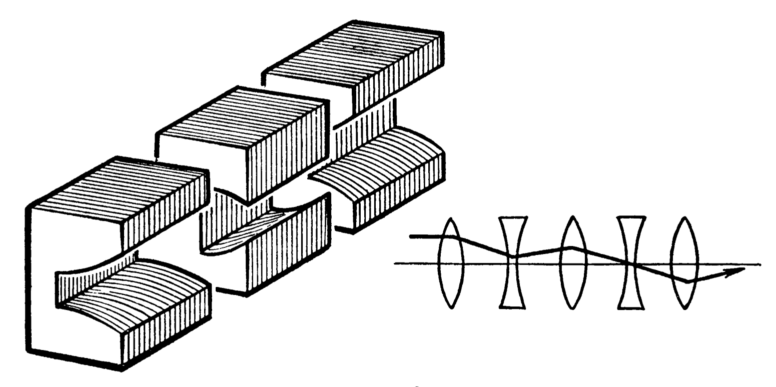


Рис. 64

гантских сооружений требует огромных материальных ресурсов. Например, строительство крупнейшего ускорителя в Батавии (США) на энергию 400 000 МэВ обошлось государству в 250 млн. долларов. Причем расходы на магнитную систему составили добрую половину стоимости всего ускорителя.

Для решения задач, которые ставит перед собой современная наука (не обладает ли пространство квантовыми свойствами? А может быть, окажется, что и время течет не непрерывно, а некоторыми порциями?), необходимы ускорители, «производящие» частицы энергией 1 000 000 МэВ. Что же будет с размерами, весом, прожорливостью мощных магнитов? Ведь ясно, что и без того громадные цифры будут все расти и расти. Но этого, очевидно, не случится.

Уже сейчас ведутся поиски новых эффективных и более экономичных путей увеличения мощности ускорителей. Так, группой ученых Радиотехнического института АН СССР создан проект сверхмощного ускорителя с автоматической корректировкой орбиты ускоряемых частиц. Этот ускоритель, получивший название кибернетического, способен разгонять протоны до энергии 1 000 000 МэВ. Длина окружности его основного кольца 15,5 км, но общий вес магнитов такой же, как и у Серпуховской машины, а размеры вакуумной камеры, в которой будут циркулировать протоны, даже в несколько раз меньше.

Большие надежды возлагают физики и на сверхпроводимость. Замена обычных магнитов компактными, почти не потребляющими мощности, сверхпроводящими магнитами — это возможность сильного увеличения магнитного поля, а стало быть, и уменьшения радиуса ускорителя. Если удастся достичь магнитного поля 10 Тл, то размеры ускорителя уменьшатся почти в 5 раз. И наоборот, при том же радиусе ускорителя увеличение индукции магнитного поля до 10 Тл позволит примерно во столько же раз увеличить энергию ускоряемых частиц. Поэтому уже сегодня большие кольцевые ускорители проектируются с таким расчетом, чтобы при необходимости можно было обычные магниты заменить сверхпроводящими.

Встречные пучки. Одна из основных трудностей на пути создания сверхмощных ускорителей — проблема увеличения энергии взаимодействия частиц высоких

энергий. По сути дела, еще со времен Резерфорда идея экспериментов по изучению микромира оставалась неизменной: пучок быстрых частиц бомбардирует неподвижную мишень. Разгоняемые до околосветовых скоростей частицы сталкиваются с мишенью, расположенной либо внутри камеры, либо на выходе пучка из ускорителя. И во все стороны разлетаются протоны, нейтроны, мезоны...

К сожалению, не вся энергия сталкивающихся частиц расходуется на рождение новых. Когда скорость частицы приближается к световой, масса ее существенно увеличивается и становится значительно больше массы частиц, находящихся в мишени. И при соударении значительная доля энергии частицы-снаряда переходит в энергию общего движения обеих частиц. А на рождение новых остается совсем немного.

Физики решили сделать мишень подвижной — направить навстречу друг другу два потока ускоренных частиц и сталкивать «снаряд» с летящей на него мишенью. В этом случае массы частиц остаются все время равными, и они могут всю свою энергию превратить в энергию взаимодействия. Так возникла идея ускорителя на *встречных пучках*.

Это выглядело очень заманчиво. При скоростях, близких к скорости света, сказываются эффекты теории относительности, и энергия суммарного взаимодействия встречных частиц может увеличиться не в 4 раза, как предсказывает механика Ньютона, а в сотни, тысячи раз. Так, при столкновении двух электронов с энергией 1000 МэВ эффект их взаимодействия будет эквивалентен энергии ускорителя на $4 \cdot 10^{12}$ эВ.

Но для того чтобы такое столкновение произошло, необходимо устроить встречу частиц. А это, как оказалось, далеко не простое дело. Плотность подвижной мишени — второго пучка — в сотни миллионов миллиардов раз меньше плотности твердого вещества, из которого изготовлена обычная неподвижная мишень. И если заменить мишень другим пучком, вероятность столкновения частиц резко упадет. По выражению академика Г. И. Будкера, под руководством которого в Новосибирском институте ядерной физики разрабатывался метод встречных пучков: «столкнуть» две частицы — задача по сложности примерно такая же, как «устроить» встречу двух стрел, одну из которых выпустил бы Робин Гуд

с Земли, а вторую Вильгельм Тель с планеты, вращающейся вокруг Сириуса.

Правда, эту вероятность можно повысить. Можно сделать пучки обильнее, увеличить число частиц в пучке. Можно пополнять пучок, впрыскивать в него новые частицы по ходу ускорения. Можно сфокусировать, сжать пучок в тонкий шнур. Можно, наконец, заставить пучки проходить друг сквозь друга многократно.

Метод доказал свою эффективность в работе с самой первой установкой сибирских физиков на встречных пучках «ВЭП-1». «Главная деталь» ускорителя — два железных кольца диаметром 86 см, спаренных в виде восьмерки. Это накопитель — кольцевой вакуумный канал с магнитной фокусировкой. Специальный синхротрон каждые 15 с методичными выстрелами заполнял его электронами энергией 43 МэВ. Коммутирующий магнит направлял частицы попеременно то на нижнюю, то на верхнюю дорожки. Здесь они раскручивались и «доразгонялись» до энергии 130 МэВ. И при таких скромных размерах установка давала энергию взаимодействия электронов, эквивалентную 100 000 МэВ (!). Напомним, что диаметр Серпуховского кольца, ускоряющего протоны до 76 000 МэВ, равен почти 0,5 км.

Благодаря экспериментаторскому мастерству сибирских физиков новый метод стал реальностью, важным средством физики высоких энергий. Теперь установки на встречных пучках сооружены или сооружаются во многих странах.

Два переплетающихся кольца диаметром 300 м — такова одна из крупнейших установок подобного типа, запущенная сравнительно недавно в Европейском центре ядерных исследований в Женеве. Протоны, вспрыснутые в кольца из обычного ускорителя энергией 23 000 МэВ, встречаются в восьми специальных участках и взаимодействуют друг с другом как частицы с энергией в 50 раз большей. Сложная система магнитов массой 5000 т удерживает их на магнитной дорожке длиной около 1000 м и 10 см в диаметре. Для проведения подобного эксперимента с неподвижной мишенью потребовался бы ускоритель, разгоняющий протоны до энергии $1{,}1 \cdot 10^{12}$ эВ. Таких ускорителей до сих пор нет.

Сейчас не представляется возможным построить и ускоритель позитронов на $2 \cdot 10^{12}$ эВ, где с неподвижной мишенью можно было бы провести те же экспери-

менты по взаимодействию электронов и позитронов, которые проводятся новосибирскими физиками на установке «ВЭПП-2». На полутораметровой кольцевой дорожке этого ускорителя впервые в мире столкнулись встречные электронно-позитронные пучки, частицы с античастицами. Общее магнитное поле раскручивает их в противоположных направлениях навстречу друг другу. В массивной магнитной дорожке, диаметром всего лишь 3 м, электроны и позитроны разгоняются до 700 МэВ, накапливаются, а затем сталкиваются. При этом энергия взаимодействия равна $2 \cdot 10^{12}$ эВ.

Но и это не предел. Физики считают, что можно говорить о строительстве установок со встречными пучками протонов и антипротонов, соответствующих ускорителю с энергией $2 \cdot 10^{15}$ эВ. Классический ускоритель на такую энергию имел бы диаметр земного шара, а его стоимость приблизилась бы к национальному доходу всей планеты.

Однако и ускорители на встречных пучках довольно сложные и громоздкие устройства. Да к тому же они связаны с обычным, классическим методом ускорения. Поэтому, решая задачи сегодняшнего дня, разрабатывая и сооружая ускорители различных типов и масштабов, ученые анализируют и проверяют совершенно новые принципы ускорения, в которых ведущую роль играют незнакомые пока ускорительной технике «герои» — свет, плазма, взрыв... Идет поиск: тщательно обсуждаются и исследуются все новые идеи, какими бы нереальными они ни казались.

След невидимок. Проникнув с помощью ускорителей в глубины материи, физики обнаружили удивительный мир элементарных частиц. Рождаясь в ядерных катастрофах при столкновении частиц-снарядов огромной энергии, они создают «красочную феерию» микромира. Тут и хорошо известные нам электроны, протоны, нейтроны, тут и массивные ядерные частицы, тяжелые мезоны и легкие нейтрино, фотоны... Подробно все и перечислить невозможно.

Даже специалистам, работающим в области физики элементарных частиц, трудно назвать точное число всех известных кирпичиков, из которых складывается гигантская пирамида микромира. Их уже более двухсот. Физики описывают их индивидуальные особенности, определяют заряд, массу, скорость... С помощью современ-

ных чувствительных приборов получают полную информацию о результатах ядерных катастроф: сколько возникло частиц, какие именно, какой энергии. Хорошо бы еще увидеть пролетающие частицы!

Конечно, в том мире, где даже атом кажется Гулливером, увидеть летящие с огромной скоростью частицы нельзя. Но их следы разрушения, которые они производят на своем пути — *треки*, физики уже давно научились делать видимыми.

Окно в мир. Туманная камера Вильсона. Еще в 1911 г. английским физиком Вильсоном была создана камера, которая позволила непосредственно увидеть и сфотографировать следы отдельных жителей микромира.

Камера Вильсона — интересный, простой и полезный прибор. Он основан на способности быстро летящих частиц ионизировать молекулы вещества, находящегося в парообразном состоянии.

Однако как по следу реактивного самолета в небе нельзя определить тип самолета, так и по следу частицы в камере Вильсона невозможно точно сказать, какая частица его оставила. Как же быть?

Выход из положения был найден советскими физиками П. Л. Капицей и Д. В. Скобельцыным. Они предложили помещать камеру Вильсона между полюсами мощного магнита. Когда заряженная частица влетает в область действия постоянного магнитного поля, то она начинает двигаться по окружности. Положение этой окружности относительно первоначальной прямолинейной траектории зависит, как известно, от знака заряда, а радиус — от скорости частицы и ее массы. Для частиц одной и той же массы скорость тем больше, чем больше радиус кривой, по которой движется частица. Таким образом, зная индукцию магнитного поля и замерив радиус трека частицы в камере Вильсона, можно узнать ее массу и энергию. Если весь след выкладывается на снимке и известна скорость частицы, то считайте, что вы измерили и время ее жизни. Магнитное поле подскажет знак заряда.

Так у физиков появилась возможность наблюдать частицы и определять многие их характеристики. Уже в 1927 г. Д. В. Скобельцын впервые сфотографировал след космической частицы в камере Вильсона, помещенной в магнитном поле. После этого ученые всего мира стали использовать камеру Вильсона для изучения кос-

мического излучения. В камеру помещали пластинки из необходимого вещества и прослеживали путь частицы до пластинки и следы тех частиц, которые вылетали из нее. И вот в 1932 г. в космических лучах был обнаружен позитрон. В камере Вильсона, помещенной внутри магнита индукцией 2 Тл, нашли следы частиц, которые могли принадлежать как бы электрону, но с положительным знаком заряда. На фотографиях треков, полученных американским физиком К. Андерсоном, было отчетливо видно, что следы электрона и позитрона отклоняются в противоположные стороны.

Так опыт подтвердил теорию. Предсказанный английским физиком П. Дираком электрон с положительным зарядом был обнаружен. Это была первая частица из антимира. Ее открытие было бы крайне затруднительным без сильного магнитного поля, без применения мощного магнита.

Камера Вильсона сыграла огромную роль в истории познания микромира. Еще в начале нашего века некоторые физики сомневались в существовании не только элементарных частиц, но даже и атомов. Камера Вильсона положила конец всяким сомнениям. С ее помощью были сделаны выдающиеся открытия.

Экспериментаторы и по сей день не расстаются с этим замечательным прибором, но используется камера Вильсона для ограниченного круга задач. Дело в том, что пар, который находится в ней, имеет небольшую плотность и не представляет собой преграды для высокоскоростных частиц-снарядов, создаваемых современными гигантскими ускорителями. Такие частицы, пройдя ускоритель беспрепятственно, пронизывали камеру Вильсона и почти не отклонялись магнитным полем. Для изучения ядерных реакций и регистрации частиц высокой энергии нужен был новый прибор, который обладал бы достоинствами камеры Вильсона — возможностью использования рабочего вещества одного типа ядер, с одной стороны, а с другой — содержал бы значительно большую массу вещества.

Такой прибор — *пузырьковая камера* — был создан в 1952 г. американским физиком Д. Глезером.

Пузырьковая камера. Пузырьковую камеру можно назвать «антикамерой» Вильсона. В самом деле, если в камере Вильсона частица оставляет след из капелек жидкости в газе, то в камере Глезера — все наоборот.

След состоит из пузырьков пара, плавающих в жидкости.

Быстродействующие пузырьковые камеры, работающие синхронно с ускорителями, стали популярными приборами во всех лабораториях мира. Возник даже термин — «физика на расстоянии». Ученые, работающие за много тысяч километров от крупнейших исследовательских центров, могут получать и исследовать снимки уникальных ядерных событий.

Современная пузырьковая камера — сложное и дорогостоящее сооружение. Зажатая в большом магните, окруженная со всех сторон многочисленными вспомогательными конструкциями, камера производит впечатление завода с обширным вакуумным, энергетическим, газовым и электронным хозяйством. Каждое такое устройство создается в течение многих лет большими коллективами научных сотрудников, инженеров и техников.

Одна из крупнейших в мире пузырьковых камер, созданная советскими физиками и инженерами из Объединенного института ядерных исследований в Дубне, установлена на Серпуховском протонном ускорителе. «Людмила» — так назвали эту двухметровую установку физики — заполнена ожиженным водородом при температуре —247 °С и весит со всем вспомогательным оборудованием около 100 т. Одна из наиболее крупных и важных частей всей установки — магнит массой 650 т. Он создает магнитное поле до 3 Тл в шахте с объемом 6 $м^3$, куда в «дьюаре» (термосе) опускается водородная пузырьковая камера.

Другая гигантская жидководородная камера — «Мирабель», разработанная французскими учеными и инженерами, установлена также на Серпуховском ускорителе. В ее рабочем объеме — цилиндре диаметром 1,6 м и длиной 4,7 м — размещается около 10 тыс. л сжиженного водорода. Масса всей установки — около 3000 т, масса магнита с алюминиевыми обмотками — 1000 т, потребляемый ток — 16 кА. Мощность, которая в обмотках этого магнита теряется, достаточна для питания крупного промышленного предприятия.

Естественно, громоздкие и неэкономичные магниты желательно заменить сверхпроводящими, тем более что пузырьковые камеры оборудуются громадными криогенными установками для охлаждения рабочей жидкости. Сверхпроводящие камеры уже эксплуатируются. Так, в

жидководородной пузырьковой камере Европейского центра ядерных исследований в Женеве используется сверхпроводящая магнитная система. В обмотке магнита с внутренним диаметром 4,7 м течет ток силой 5,5 кА. Здесь создается поле индукцией до 3,5 Тл. Сверхпроводящий магнит пузырьковой камеры Арагонской национальной лаборатории (США) диаметром 3,7 м и длиной 2,5 м создает магнитное поле индукцией до 2 л.

Для изучения всепроникающей частицы — нейтрино в Европейском центре ядерных исследований и в Институте физики высоких энергий в Серпухове установлены цилиндрические камеры «Гаргамель» и «Скат» диаметром 1,5—2 м и шириной 4,5—4,8 м. В рабочем объеме этих камер используется жидкий пропан или фреон. Магнитное поле весьма высокое — 2,5—3 Тл. Создаются камеры и с другими рабочими жидкостями — ксеноном, дейтерием, гелием. С их помощью физики вглядываются в самые «заповедные» глубины микромира. От экспериментаторов продолжают поступать сообщения об открытии все новых и новых частиц.

Когда завершится список кирпичиков материи? Может быть, список этот уже завершен? А может быть, он только начинается?

Загадочный монополь. Полвека призрачного существования. Вглядываясь в «лики» обитателей микромира, физики уже давно подметили, что необыкновенно разные по массе, времени жизни и другим свойствам элементарные частицы имеют совершенно одинаковый электрический заряд, в точности равный заряду электрона.

Единственное объяснение этому удивительному экспериментальному факту дал в 1931 г. выдающийся физик-теоретик П. Дирак. Его замечательное уравнение для электрона, лежащее в основе электродинамики, впервые распахнуло двери в антимир. Оно неожиданно для всех предсказало существование «положительного электрона» — позитрона. И оно же позволило Дираку сделать еще один важный вывод о возможности существования *частицы с магнитным зарядом* — так называемого *монополя*.

Если монополи — реальность, то согласно теории они дол ны были бы стать полным магнитным эквивалентом зарядов электрических. Могли бы, например, порознь существовать «северные» и «южные» магнитные заряды.

В это трудно было поверить. Никому еще не удавалось получить отдельный северный или южный полюс. Но после того как в 1932 г. Андерсон обнаружил в камере Вильсона позитрон, доверие к монополям Дирака резко возросло. Надо было действовать, и физики ринулись на поиски новых частиц.

С тех пор прошло полвека, а проблема монополя Дирака еще не решена ни в какую сторону: не доказано ни его наличие, ни его отсутствие. Нет и иных конкурирующих с ней гипотез. Подобно призраку монополь дразнит воображение и заставляет физиков время от времени пускаться на его поиски. Сложилась странная ситуация. До сих пор было известно, что все магнитные явления возникают в результате движения электрических зарядов. Мы уже говорили о том, что магнитные линии индукции нигде не начинаются и не кончаются — они замкнуты на себя. Они не имеют источника. Это действительно так. Но обратите внимание: электрические и магнитные явления обнаруживают заметную ассиметрию.

В самом деле, одних электрических зарядов оказывается достаточно для создания как электричества, так и магнетизма. Для возникновения магнетизма электрические заряды должны прийти в движение, а сами по себе заряды даже в состоянии покоя порождают электрические явления. Стало быть, электричество имеет источник — электрический заряд, а магнетизм имеет источником лишь электричество. Получается, что электричество как будто вполне может обойтись без магнетизма, а магнетизм без электричества — нет.

А что говорит теория? Не содержит ли она нечто оправдывающее преимущество электричества перед магнетизмом? Именно это и решил выяснить Дирак. Такого преимущества не оказалось. Как классическая, так и квантовая электродинамика (в которой многие видят прообраз будущей теории элементарных частиц) «не возражали» против симметрии в электрических и магнитных явлениях. В природе могли бы также существовать элементарные источники магнитных явлений, элементарные магнитные заряды. Но человек не может предписывать природе законы. Электрические заряды обнаружены в избытке, магнитных никто никогда еще не наблюдал.

А может быть, ищут не то? Или не там? Наконец

известно ли что-нибудь физикам об этой загадочной частице?

Основные свойства монополя подсказал сам Дирак. Он показал, что если монополь существует, то его магнитный заряд μ должен быть связан с единичным электрическим зарядом e соотношением $\mu = 68{,}5\ en$, где n — произвольное целое число.

Таким образом, по Дираку, минимальное значение магнитного заряда в 68,5 раз больше единичного электрического заряда, т. е. заряда электрона. Стало быть, сила взаимодействия двух магнитных зарядов в $(68{,}5)^2 \approx 4700$ раз больше, чем сила взаимодействия электронов. А это значит, что движущийся с околосветовой скоростью монополь должен ионизировать атомы окружающей среды в 4700 раз сильнее, чем электрон.

Заряд — важнейшая улика, скрыть которую невозможно. След монополя должен быть совершенно отчетливо виден в трековом детекторе. Попади он в фотоэмульсию, он оставил бы в ней такой же густой и толстый след, какой оставляет тяжелое ядро.

И еще. Монополь со столь большим зарядом должен легко подчиниться влиянию магнитного поля. Он должен очень легко приобретать энергию в магнитном поле. Например, пройдя путь 1 см в сравнительно небольшом поле индукцией 0,1 Тл, монополь приобретает энергию примерно $2 \cdot 10^7$ эВ. Даже слабое поле Земли будет действовать на него так же, как действует на электрон электрическое поле $E = 10^7$ В/м.

Как могут создаваться монополи? Физики предполагают, что пары монополей, как и другие элементарные частицы, могут рождаться при столкновении частиц высокой энергии с веществом. Таким образом, монополи могут быть найдены в продуктах взаимодействия разгоняемых в ускорителях частиц. Энергия, которую частицы приобретают в современных ускорителях, достаточна для создания монополей в тысяти раз тяжелее протонов. Поставив рядом с камерой, регистрирующей взаимодействия, очень мощный магнит, можно было бы «вытянуть» монополи из области взаимодействия.

Подобные эксперименты на крупнейших ускорителях мира неоднократно проводились как у нас в стране, так и за рубежом. Предпринимались разные попытки обнаружить эти загадочные частицы. Пока все эти

эксперименты оказались безрезультатными. Не было обнаружено ни одной частицы.

Пытались обнаружить монополи и в космических лучах. В них встречаются частицы с грандиозной энергией, получить которую на земных ускорителях невозможно. Пока и в этих экспериментах не удалось обнаружить ни одного монополя.

Не сопутствовала удача и исследователям, пытавшимся «вытянуть» их с помощью мощного магнита из горных пород и метеоритов. Свободные монополи могли попасть на Землю в составе космических лучей или возникнуть в земной атмосфере. Тут всплывает главная примета монополя: магнитный заряд особенно чувствителен к магнитным веществам. Эта частица должна будет дрейфовать по линиям индукции магнитного поля до тех пор, пока не встретит на своем пути железо или железные руды. Взаимодействуя с ними, частицы будут накапливаться в горных породах.

В некоторых районах земного шара залежи железных руд выходят на поверхность Земли и поэтому легко доступны для изучения. В таких районах были сделаны попытки извлечь из руды монополи при помощи мощных импульсных соленоидов. Для регистрации был применен метод ядерной фотоэмульсии. Ни одного монополя в процессе экспериментов зарегистрировано не было. Не обнаружили монополей и в образцах минералов, добытых со дна океана, где они могли накопиться в течение миллионов лет. Искали их даже в образцах лунного грунта, доставленного на Землю участниками экспедиции «Аполлон-11». Лунную породу на движущейся ленте многократно протаскивали через контур из сверхпроводящего материала в надежде получить в замкнутом проводнике электрический ток. Но тока, наведенного источником магнитного поля, обнаружить так и не удалось.

Поэтому легко представить себе тот интерес, который вызвало сообщение американского физика Кабреры из Стенфордского университета (США). В статье, опубликованной в марте 1982 г., автор рассказывал, как он в сравнительно простом эксперименте обнаружил магнитный монополь. В опыте использовалась ниобиевая сверхпроводящая катушка, в которую была введена порция энергии. Поскольку сопротивление сверхпроводящей проволоки равнялось нулю, то ток в катушке протекал

несколько месяцев без каких-либо существенных изменений. Внезапно сила тока в цепи резко возросла, и после этого «события» магнитный поток так и остался более сильным. Кабрера объяснил это пролетом через катушку магнитного монополя, который ввел в систему дополнительную энергию, т. е. навел в катушке дополнительную ЭДС, что и привело к возрастанию силы тока. Достоверность такого вывода оценивается им на 95% (оставшиеся 5% он отводит на возможные ошибки). Однако специалисты оценивают возможность ошибки значительно выше и полагают, что с признанием открытия пока нужно подождать. (Совсем недавно Кабрера начал новую серию экспериментов на более чувствительной установке. За первые два месяца наблюдений ни одного «события» не зафиксировано.)

Итак, пока ни один из поставленных опытов не дал положительных результатов. Значит ли это, что монополь не существует, что можно прекратить его поиски, что надо вообще перестать заниматься этой проблемой?

Трудно сказать. Ситуация на сегодняшний день остается весьма неопределенной: монополи не найдены, и пока неясно не только когда они будут открыты, но и будут ли открыты вообще.

Монополей нет, поэтому их и не нашли — такой точки зрения придерживается большая группа ученых. Оптимисты все-таки надеются на открытие монополей, аргументируя свое убеждение примерно так: нет такого закона, который запретил бы их существование, и придумать такой запрет ничуть не проще, чем открыть монополь. Из того, что магнитные заряды не найдены, нельзя делать выводы об их отсутствии.

Ну что же, эти слова не лишены истины. Ведь никому в сущности неизвестно, как ведут себя монополи в веществе. Физики полагают, что они могут рождаться в результате столкновения частиц высокой энергии с веществом. Но какой энергии? Теория Дирака не отвечает на этот вопрос. Необходимая для рождения монополя энергия зависит от его массы, а о ней нам почти ничего неизвестно. Опыты дают отрицательный ответ на вопрос о существовании сравнительно легких монополей. Если же монополь достаточно тяжел, то нужны качественно новые эксперименты.

А вот и еще одна неопределенность. Магнитный заряд монополя и другие его свойства получены в пред-

положении, что наименьший электрический заряд равен e. Ну, а если существуют частицы с дробным зарядом, так называемые кварки? Если электрический заряд равен не e, а, скажем, $e/3$, тогда все основные свойства монополя резко изменятся. В этом случае нужны новые расчеты и новые опыты. Если монополь будет найден, сразу прояснится, почему все электрические заряды кратны. А ведь квантование электрического заряда действительно существует и до сих пор не имеет никакого другого объяснения. Не является ли оно указанием на существование монополя?

И наконец, еще одно. Может оказаться, что Дирак ошибался и его соотношение неверно. Монополи, если они существуют, вовсе не должны иметь заряд именно в 68,5 раз больше электрического. Они могут иметь заряд, например равный электрическому (согласно одной из теорий минимальный заряд монополя равен $17e$). А таких монополей не искали.

Как видите, вопрос о том, могут ли существовать монополи, остается открытым. Смогут ли экспериментаторы дать четкие ответы на поставленные теоретиками вопросы? Пока неизвестно. Во всяком случае, отсутствие в природе монополей — факт огорчительный для самих физиков-экспериментаторов, которые продолжают тратить усилия (и деньги) на создание сложных инженерных сооружений — ускорителей заряженных частиц. Подсчитано, что ускоритель, стреляющий монополями, а не электрически заряженными частицами, был бы при той же энергии ускоряемых частиц во много раз дешевле аналогичных машин сегодняшнего дня. Если бы монополи действительно существовали, то ввиду большого магнитного заряда (пока так считают) их было бы удобнее разгонять с помощью магнитного поля. Ускорение в магнитном поле происходило бы быстро и очень эффективно.

Ну, а если монополей нет и они не будут найдены, то «закрытие» этой проблемы будет для физиков не меньшим достижением, чем возможное их открытие.

ПЛАЗМА В МАГНИТНОЙ УПРЯЖКЕ

...Тогда он
Разные виды начнет принимать
и являться вам станет...
Вы ж, не робея, тем крепче
его, тем сильнее держите.

Гомер. «Одиссея»

Одной из наиболее острых и важных проблем, решаемых сегодня наукой, является проблема осуществления управляемой термоядерной реакции. Есть веские основания полагать, что успешное решение этой проблемы, которая сулит человечеству неисчерпаемые источники энергии, возможно при использовании мощных магнитов.

По этому пути ученые и инженеры идут уже почти три десятилетия. Срок не такой уж большой, но это целая эпоха. И все же цель еще не близка. Многое предстоит изучить и создать, прежде чем на Земле зажгутся огоньки электростанций, работающих так же, как работает наше Солнце.

Солнце на Земле. Жизнь на Земле во всем поразительном многообразии непосредственно связана с деятельностью Солнца, этого поистине фантастического по нашим земным представлениям термоядерного реактора.

В общих чертах ученые знают, как работает солнечная «установка», вырабатывающая гигантскую энергию, благодаря которой на Земле возникла жизнь и появился человек. Во внутренней «топке» Солнца атомы водорода, соединяясь, образуют атомы гелия. Такая реакция слияния (синтеза) легких ядер в более тяжелые называется *термоядерной реакцией* или «термоядом», как выражаются иногда физики.

Энергию, выделяющуюся в реакциях слияния, человек использует с незапамятных времен. С тех пор, как он научился пользоваться огнем. Но это — химическое слияние: соединение атомов кислорода с атомами горючего.

А вот если два ядра атомов легких элементов сблизить вплотную, произойдет ядерное «слияние» — *синтез.* В результате из двух легких ядер образуется более тяжелое ядро и выделяется энергия.

Почему здесь выделяется энергия? Дело в том, что масса атомного ядра оказывается не равна сумме масс протонов и нейтронов — этих кирпичиков, из которых построено любое вещество, — а несколько меньше. Например, ядро гелия ^{4}He состоит из двух протонов и двух нейтронов и имеет массу 4,0026 (в атомных единицах массы — 1 а.е.м. $= 21{,}66 \cdot 10^{-27}$ кг). В то же время масса двух протонов и двух нейтронов равна 4,03298. Таким образом, масса ядра гелия меньше суммы масс, составляющих ядро частиц на 0,0302 а.е.м.

Значит, если мы попытаемся синтезировать ядро атома из более мелких частиц, то при объединении в ядро они «потеряют» некоторую часть своей массы. А так как материя не исчезает бесследно, то при этом пропорционально образовавшемуся недостатку массы должна выделиться энергия. Все в точном соответствии со знаменитой формулой Эйнштейна $E = mc^2$. Чем больше разница масс «кусков» и «целого», тем больше энергии мы можем получить. Одна из наиболее «выгодных» в этом отношении реакций — синтез ядер гелия из ядер дейтерия — тяжелого водорода. Из дейтерия, содержащегося в 1 л воды, можно получить столько же энергии, сколько из 350 л бензина.

Когда ядра сливаются. Итак, для того чтобы получить море энергии, нужно научиться прилеплять одно ядро дейтерия к другому. Но в этом и заключается трудность. Ведь ядра атомов заряжены положительно, а всякие одноименно заряженные частицы отталкиваются, и, чем меньше расстояние между ними, тем больше силы отталкивания. Чтобы произошла реакция, нужно преодолеть эту силу отталкивания, вплотную сблизить ядра. Тогда в игру вступают короткодействующие ядерные силы притяжения, которые совершенно подавляют отталкивание. Но как это сделать? Как сблизить ядра?

Ответ прост: их нужно посильнее разогнать. Чтобы прорваться через электростатический барьер, ядра должны двигаться достаточно быстро. Тогда они с разгона «перемахивают» через этот заслон и вопреки силам отталкивания накрепко сцепляются «баграми» ядерных сил. И снова вопрос: а как разогнать ядра?

Один из способов — нагревание вещества. Средняя скорость движения атомов (а стало быть, и ядер) тем больше, чем выше температура вещества. Вот поэтому для осуществления термоядерной реакции нужно эту температуру поднять выше некоторого порога, равного десяткам, а то и сотням миллионов градусов.

Такую чудовищную температуру научились «готовить» в термоядерных бомбах. Роль «спички» здесь выполняет атомная бомба, в которой источник энергии — деление ядер. Но термоядерная реакция, которая протекает в водородной бомбе, неуправляемая и может принести только разрушения.

Чтобы извлечь из процесса синтеза полезную энергию, необходимо осуществить контроль над термоядерными реакциями, найти способы создания и поддержания температур во много миллионов градусов.

Шаг за шагом продвигаются ученые к решению проблемы управления термоядерным синтезом. Тяжелый изотоп водорода нагревают до высоких температур мощными электрическими разрядами. *Возникает плазма.*

Плазма — это особое состояние вещества. Каждый день нам приходится иметь дело с тремя состояниями вещества: газообразным, жидким и твердым. А при газовом разряде (искре, дуге и т. д.) мы сталкиваемся с *плазмой — четвертым состоянием вещества.* Почти вся материя Вселенной находится именно в этом четвертом состоянии: и Солнце и Звезды состоят из раскаленной плазмы. В этом состоянии у атомов вещества оторваны электроны. Электроны и положительно заряженные ядра свободно плавают в плазме. Поэтому любое вещество в состоянии плазмы обладает высокой электропроводностью.

Новые необычайные свойства проявляются у плазмы, когда на нее действует сильное магнитное поле. Такую плазму физики называют *замагниченной.* В сильном магнитном поле частицы плазмы вращаются вокруг линий индукции. Вдоль магнитного поля частица движется свободно. Если же заставить плазму двигаться поперек магнитного поля, она «потащит» за собой линии индукции. Частицы плазмы как бы «приклеены» к линиям индукции, или, как говорят, магнитное поле «вморожено» в плазму.

Но этот закон «вмороженности» действует только в горячей плазме. Такая плазма почти не оказывает со-

противления электрическому току. В холодной плазме с низкой проводимостью взаимодействия между частицами при столкновениях позволяют магнитному полю как бы просачиваться сквозь плазму.

Конечно, эпитет «холодная» употреблен здесь в относительном смысле. Тысячи градусов — какой уж там холод. Но у горячей плазмы температура исчисляется по меньшей мере миллионами градусов. При таких температурах вещество превращается в бурлящую смесь положительно заряженных ядер и электронов. И эту действительно горячую плазму нужно каким-то образом на некоторое время удержать в ограниченном объеме.

Какой сосуд выдержит столь высокую температуру? Только прикоснувшись к стенкам сосуда, горячая плазма либо охладится до температуры, при которой реакция затухнет, либо же испарит стенку. Кроме того, при таких температурах возникает чудовищное давление на стенки от летящих с огромной скоростью ядер. Это выдвигает еще одно, казалось бы, непреодолимое требование к материалу стенок — он должен иметь непомерную прочность.

Материалов, удовлетворяющих этим требованиям, нет и не может быть в природе. Это очевидно. Но выход все-таки есть.

Стенки могут быть и магнитными. Разумеется, горячую плазму, практически целиком состоящую из ядер и электронов, невозможно удержать ни в одном сосуде.

Мы знаем, как справляется с этой задачей термоядерный реактор нашего Солнца. На Солнце и в других звездных телах горячая плазма удерживается мощными гравитационными полями. Огромные силы тяготения удерживают плазму в центральной области и не позволяют основной массе разогретого вещества уйти в космическое пространство.

Однако на Земле горячую плазму так не удержать, слишком мала здесь сила гравитации. Единственная возможность — использование магнитного поля. Ведь речь идет о заряженных частицах, которые подвержены действию магнитных сил.

Вспомните, как действует магнитное поле на движущиеся заряды. Это как раз та сила, которая искривляет путь любых заряженных частиц и заставляет их двигаться вдоль линий индукции магнитного поля. Значит, если поместить плазму в сильное магнитное поле,

созданное таким образом, чтобы линии индукции этого поля со всех сторон обволакивали ее, то можно получить клубок горячей плазмы, который будет висеть в вакууме и не будет взаимодействовать со стенками сосуда, где он находится.

Все дело в том, что заряженные частицы, из которых состоит плазма, не могут двигаться перпендикулярно магнитному полю. Они могут двигаться только вдоль линий магнитной индукции.

Магнитная бутылка. Если конфигурацию магнитного поля сделать такой, при которой линии индукции сходясь напоминали горлышко бутылки, то при определенных параметрах поля такое горлышко будет заперто для плазмы. Принципиальная схема такой ловушки показана на рисунке 65.

Ловушка представляет собой цилиндр, в котором внешняя катушка (соленоид) создает продольное магнитное поле. У концов цилиндра посредством более частой намотки (или с помощью дополнительных катушек) создаются области сильного магнитного поля, так называемые *магнитные пробки* или *магнитные зеркала.*

Поскольку в магнитной бутылке поле увеличивается вблизи концов соленоида, то частицы будут как бы отталкиваться от этих концов: их движение по направлению к торцам трубки будет тормозиться и в конце концов превратится в обратное движение к центру цилиндра. Таким образом, частицы, попавшие в магнитную бутылку, не могут покинуть систему, и плазма мечется между магнитными пробками. На этом принципе была построена одна из первых крупных термоядерных установок — «Огра-1», разработанная советскими физиками в 1958 г. Примерно таким же путем двигались американские и английские ученые, создавшие несколько установок с магнитными зеркалами.

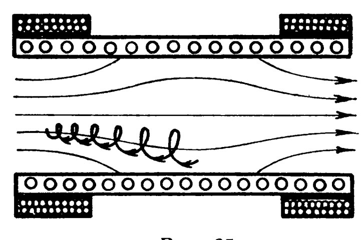


Рис. 65

Но как это часто бывает, решение одной проблемы вызывает другую, которую также нужно решать. Оказалось, что конфигурация поля в ловушке указанного типа не обеспечивает стабильности относительно движения частиц к стенкам камеры. В такой системе маг-

нитное поле убывает по радиусу, т. е. в сторону от оси. Конечно, если бы колонна частиц плазмы всегда «маршировала в ногу», она бы хорошо удерживалась полем. Но в этом ей мешает неустойчивость.

Неустойчивость — это бич плазмы. Стоит где-нибудь на боковой поверхности плазменного строя случайно появиться маленькому горбику, как он будет расти в радиальном направлении. Строй ломается, возникают плазменные языки, которые распространяются все дальше, и уже менее чем за тысячную долю секунды плазма оказывается на стенках камеры.

Чтобы продлить жизнь плазмы, следовало найти такую конфигурацию, при которой магнитное поле возрастало бы во всех направлениях. Иными словами, необходимо усложнить конфигурацию магнитного поля. На практике это более или менее успешно достигается путем установления дополнительных витков. Так появились магнитные системы со встречными полями: ловушки с конфигурацией проводников, напоминающих шов теннисного мяча, где плазма в любом направлении встречает возрастающее магнитное поле и целый ряд других установок.

И вот результат: в установке с магнитной системой комбинированного типа советским физикам впервые удалось продлить жизнь плазмы до десятых долей секунды. Они так удачно расположили вдоль образующих цилиндра дополнительные проводники с током, что плазма перестала пролезать между линиями индукции и преждевременно гибнуть. Прямолинейные проводники с противоположно направленными токами создавали магнитное поле, препятствующее приближению плазмы к стенкам. Это было крупнейшим достижением. К сожалению, в такой установке выживала лишь очень разреженная плазма. Причем в этом отношении все варианты зеркальных ловушек имеют принципиальный дефект. Даже при обеспечении полной устойчивости плазма может сохраниться долго только в том случае, если ее температура очень велика или же плотность очень мала. Достаточно одного столкновения, чтобы направление скорости частицы изменилось и она смогла пройти через «горлышко» бутылки. Поэтому основная утечка частиц идет в продольном направлении сквозь «дырявые магнитные зеркала». Как же удержать этих беглецов?

Может быть, попробовать устроить плазму в кольце-

вом магнитном поле? Как говорится, «у кольца нет конца» — и плазма не найдет из него выхода.

Тороидальные магнитные ловушки. Для этого достаточно согнуть цилиндр в кольцо. Получится тело вроде баранки или бублика, называемое в геометрии тором.

В такой системе внешняя обмотка создает продольное магнитное поле, удерживающее плазму от ухода в поперечном направлении на стенки камеры (рис. 66). Вдоль поля плазма движется свободно, накручиваясь на магнитные линии, но это не приводит к уходу ее из ловушки, поскольку кольцевая конфигурация поля не имеет концов.

Но плазма, как выяснилось, может найти выход там, где его как будто и нет. А повинна в этом опять-таки неоднородность магнитного поля. Оказалось, что в тороидальной камере магнитное поле у внутренней стороны стенки выше, чем у наружной, т. е. линии индукции гуще с внутренней стороны баранки и реже с внешней. Эта разница, или, как говорят, градиент магнитного поля, «выжимает» плазму к стенкам камеры.

Заряженные частицы медленно движутся (*дрейфуют*) в направлении, перпендикулярном магнитному полю, и в конце концов соприкасаются со стенками камеры. Поскольку положительно и отрицательно заряженные частицы вращаются вокруг линий индукции в противоположных направлениях, их дрейф также происходит в противоположных направлениях. Положительно заряженные ядра налетают на «потолок», а отрицательные электроны — на «дно» камеры. Происходит разделение электрических зарядов, и возникающее электрическое поле совершенно искажает орбиты частиц.

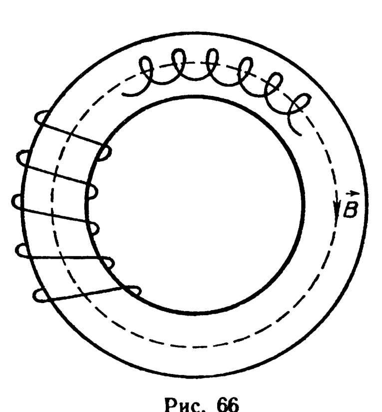


Рис. 66

Этот поперечный дрейф можно в среднем свести к нулю для большинства частиц, если заставить магнитные линии индукции закручиваться по винту при обходе вокруг тора. Иными словами, на каком-то участке поменять местами «пол» и «потолок». Тогда длина всех линий индукции была бы

одинаковой и все они оказались бы в равных условиях.

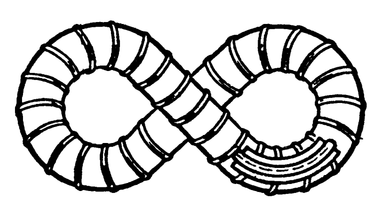


Рис. 67

«Хитрость» состоит в том, что, начав на одном участке падать на «пол», на другом, соседнем, частица должна будет падать на «потолок». В результате смещение зарядов при их движении компенсируется и среднее расстояние частицы от оси камеры остается неизменным. Подобная система была использована в тороидальных камерах типа *стелларатор* (от слова «стелла» — звезда). В первоначальной конструкции стелларатора сам тор с обмоткой (соленоид) закручивался в виде восьмерки (рис. 67). В дальнейшем научились создавать винтовое поле, не нарушая форму тора, посредством нескольких дополнительных обмоток с противоположно направленными токами. В настоящее время главной проблемой, связанной с ловушками типа стелларатор, является трудность их изготовления и дороговизна. Будут ли представлять интерес стеллараторы в качестве реакторов, покажет время.

Плазменный шнур. Впрочем, мы пока ни слова не сказали еще об одной чрезвычайно интересной стороне дела. Речь идет о магнитном поле самой плазмы.

Если в плазме существует какое-то упорядоченное движение заряженных частиц, стало быть, ее можно представить как своего рода проводник с электрическим током. Такой ток образует магнитное поле, линии индукции которого охватывают плазменный проводник. При этом сила взаимодействия тока с его собственным магнитным полем направлена к оси проводника и стремится сжать его. Вспомните школьный опыт с параллельными токами. Они, как известно, притягиваются друг к другу, и поэтому любой проводник с током стремится сжаться.

Значит, если через плазму пропустить ток, то возникающее магнитное поле сожмет плазменный проводник и тем самым изолирует его от стенок сосуда. По идее все достаточно просто. Да и магнитное поле не нужно создавать специально. Оно возникнет само по себе, когда через плазму потечет ток.

Эта мысль у физиков возникла одной из первых. Сначала идея магнитной термоизоляции плазмы соб-

ственным полем была реализована в обычной разрядной трубке. Через дейтериевый газ, находящийся в трубке, в течение миллионной доли секунды пропускали мощный электрический разряд. Для этого применяли большую батарею конденсаторов. При быстром ее разряде можно получить ток очень большой силы.

Все произошло так, как и предполагали. Ток, нагревая газ, создавал плазму, а магнитное поле тока отрывало ее от стенок и стягивало в плотный сверкающий шнур. Такой плазменный шнур часто называют английским словом *пинч*, а само явление сжатия плазмы собственным полем получило название *пинч-эффекта*.

Это явление, казалось бы, полностью решает задачу магнитной термоизоляции плазмы. Плазменный шнур не соприкасается со стенкой и как будто может долго существовать при большой температуре. В действительности — увы! Оказалось, что плазменный шнур с током — это очень непрочное, а главное — недолговечное образование. Он подвержен целому ряду неустойчивостей.

Чтобы упрочить плазменный шнур и продлить жизнь плазмы, надо придать шнуру необходимую магнитную жесткость. Иными словами, создать каркас — стержень, противостоящий магнитному полю, охватывающему плазму. Роль такого стержня выполняют линии индукции продольного магнитного поля, создаваемого каким-то посторонним источником, например катушкой, намотанной прямо на камеру.

Применение этого несложного способа резко повысило устойчивость плазмы и изменило картину. Теперь магнитные линии, сжимающие плазменный шнур, встречали на своем пути не только собственно плазму, но и упругие продольные линии индукций, препятствующие перетяжкам. Одновременно продольное магнитное поле эффективно противостоит и другому виду неустойчивости — изгибу плазменного шнура. Действуя как упругий стержень, вставленный в плазму, поле стремится ликвидировать любой случайный изгиб, возникший у шнура. Чем сильнее продольное магнитное поле, тем устойчивее плазменный жгут к различного рода случайным возмущениям.

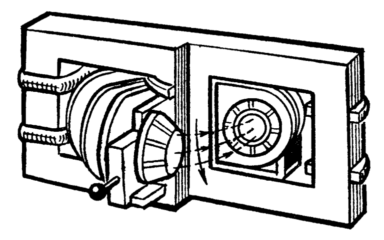
На использовании таких средств для устранения неустойчивости плазмы основана конструкция целой серии экспериментальных установок. Одни из них, напри-

мер такие, как американская «Сцилла», похожи на разрядную трубку, где плазму удерживают с помощью дополнительного проводника с током. Однако горячая плазма живет в ней лишь несколько миллионных долей секунды.

В других — разрядная камера имеет тороидальную форму. Она надевается на железный сердечник трансформатора. Ток в газе, заполняющем камеру, возбуждается индукционным путем. Если на первичную обмотку трансформатора дать мощный импульс тока, то в газовом витке также возникает электрический ток. Этот ток проходит по газу, разогревает его до высокой температуры, превращая в плазму. Плазма, отдаленная от стенок сжимающими ее магнитными силами, образует кольцо, расположенное вдоль оси камеры. В таком сочетании кольцевой плазменный виток выполняет функцию вторичной обмотки трансформатора. Экспериментальные установки такого типа были разработаны советскими учеными и, пожалуй, больше других продвинулись к заветной цели. Ныне они широко используются во многих лабораториях мира и образуют целое семейство, получившее условное название *токамак*.

Токамак. Это название было составлено из слов, обозначающих основные элементы установок: *тор — камера — магнитные катушки* (рис. 68).

Токамак не бьет по плазме мгновенным электрическим разрядом огромной мощности, не гоняет ее между магнитными пробками. Плазма свободно растекается в похожей на баранку камере, вдоль линий магнитной индукции. Металлическая тороидальная камера надевается прямо на ярмо трансформатора, и в ней индукционным путем создается кольцевой ток. Этот ток ионизует газ, образует плазму, и удерживает ее с помощью собственного магнитного поля. Кроме того, и баранка имеет свои обмотки, создающие в ней продольное магнитное поле. Это громадные соленоиды, которые приходится питать при помощи мощных импульсных генераторов.


Рис. 68

Сложность заключается в том, что энергия, необходимая для питания таких

магнитов, будет превышать выходную мощность термоядерного реактора; в лучшем случае для запуска системы потребуется специальная мощная электростанция. Единственный выход — использование сверхпроводящих соленоидов. Только в этом случае полезная мощность реактора будет больше мощности, потребляемой магнитной системой. Сегодня мало кто сомневается в том, что термоядерный реактор будущего может работать лишь со сверхпроводящей магнитной системой. В ней при небольших затратах энергии создаются достаточно сильные магнитные поля. Такая система уже проверена в Институте атомной энергии им. И. В. Курчатова на установке «Токамак-7». Ее сверхпроводящий магнит потребляет всего 300 кВт мощности, тогда как для магнита в обычном исполнении, охлаждаемого водой, в такой установке потребовалось бы в импульском режиме 200 тыс. кВт.

Сейчас на установке «Токамак-7» ведутся плазменные эксперименты и тщательным образом изучается поведение сверхпроводящей системы, на долю которой приходится нелегкая работа. Ведь всего в нескольких сантиметрах от сверхпроводящей обмотки, охлажденной чуть ли не до абсолютного нуля, бушует термоядерное пламя с температурой в миллионы градусов.

Исследования на токамаках начались с температуры плазмы около 100 тыс. град. и со значения главного параметра плазмы — произведения плотности плазмы на время ее жизни — около 10^7. За годы, прошедшие со дня первых экспериментов, почти в каждой новой установке типа «Токамак» удавалось повысить параметры плазмы. Уже в конце 60-х г. физикам удалось поднять температуру до 5 млн. град., а значение главного параметра увеличить до 10^{11}. Затем рост еще в 10 раз. Физики все ближе подбираются к заветной цели: по расчетам, для зажигания самоподдерживающейся термоядерной реакции достаточно, чтобы плазма плотностью 10^{14} частиц в кубическом сантиметре, нагретая до температуры 80—100 млн. град., удерживалась в камере без соприкосновения с ее стенками в течение нескольких секунд.

Результаты экспериментов на установках типа «Токамак» чрезвычайно обнадеживающи. Именно на этих установках впервые удалось объединить высокую температуру плазмы (до 80 млн. град.), ее высокую плот-

ность (до 10^{15} частиц в кубическом сантиметре) и значительное время удержания (до 0,1 с). В 1975 г. вошла в строй установка «Токамак-10», обладающая рекордными характеристиками. Следующий шаг — физическая демонстрация управляемой термоядерной реакции на установке «Токамак-15». А впереди основная цель — первый энергетический термоядерный реактор — электростанция.

И на Земле и в космосе... Термоядерный реактор еще не работает, но произведенные для него исследования и разработки стимулировали развитие новой, чрезвычайно перспективной науки, получившей название *магнитной гидродинамики* (сокращенно МГД).

Гидродинамика — это наука о течении жидкостей. При изучении движения жидкости (а воздух и вообще любой газ тоже жидкости, но только сжимаемые) гидродинамика имеет дело как со свойствами самой жидкости, так и с действующими на нее силами — давления, гравитации, трения. Но если жидкость (или газ) электропроводна и движется в магнитном поле, то возникают дополнительные силы — магнитные. Законы такого движения и изучаются *магнитной гидродинамикой.*

Надо сказать, что магнитная гидродинамика зародилась еще в 40-х г. нашего столетия как одна из областей астрофизики. Перед ней стояла задача изучения закономерностей движения плазмы в космических магнитных полях. И сейчас космическая магнитогидродинамика успешно развивается, все расширяя области своего применения, — здесь и движение гигантских космических газовых туманностей, и плазма солнечной атмосферы, пронизанная магнитными полями, и явления в земной ионосфере, включая полярные сияния и магнитные бури, и окружающий Землю ореол радиационных поясов...

Но пока магнитная гидродинамика была космической, ею интересовались лишь астрофизики. Все попытки ее практического применения в других целях наталкивались на непреодолимые трудности. Время «земных» профессий магнитогидродинамики еще не пришло. Чтобы спустить ее на Землю, ученым предстояло проникнуть в тайны плазмы.

Впрочем, «земные» опыты по исследованию взаимодействия магнитного поля с электропроводящей жидкостью и даже с плазмой ставились еще в начале XIX в. Так, Дэви в 1821 г. наблюдал отклонение электрической

дуги магнитным полем, а Фарадею принадлежит попытка измерить электродвижущую силу — ЭДС, индуцированную при движении воды в магнитном поле Земли. В сущности это была попытка создания первого магнитогидродинамического генератора электроэнергии.

МГД-генератор. Основная идея, на которой может быть основано использование плазменных процессов для преобразования энергии, очень проста.

Известно, что при движении в магнитном поле проводника в нем возбуждается ЭДС. Если концы проводника замкнуть на какую-либо нагрузку (сопротивление), то в такой цепи пойдет электрический ток. Именно на этом принципе электромагнитной индукции, открытой Фарадеем полтораста лет назад, и работают все генераторы электрического тока, преобразующие механическую энергию движения проводника в магнитном поле в электрическую.

Но обязательно ли, чтобы двигался металлический проводник? Вообще говоря, нет.

Рассмотрим такую схему. Пусть проводником, пересекающим магнитное поле, является низкотемпературная плазма — газ, нагретый примерно до 2500 град. Такой газ, как мы уже знаем, обладает хорошей электропроводностью. Его атомы ионизованы, и он состоит из положительно заряженных ионов и электронов. Заставим этот газ с большой скоростью двигаться между полюсами мощного магнита. Так же как и в случае металлического проводника, в целом газ нейтрален, но сила, возникающая при его движении в магнитном поле, заставит положительные ионы двигаться в одну сторону, электроны — в другую. Возникает разделение зарядов, а с ним и ЭДС. Если теперь электроны, соответствующим образом расположенные вдоль плазменного канала, соединить с внешней нагрузкой, то эта ЭДС создаст ток (в направлении, перпендикулярном движению газа и линиям индукции магнитного поля), способный совершать полезную работу. Получится *плазменная динамомашина,* или, как ее называют, *МГД-генератор* (рис. 69). Энергетика связывает с таким генератором большие надежды.

МГД-движитель. Но магнитная гидродинамика «умеет» не только генерировать электричество. Магнитное поле может быть использовано также и для *разгона плазмы* до больших скоростей.

Известно, что электрические машины, как правило, обратимы. Следовательно, магнитогидродинамический преобразователь может превращать кинетическую энергию плазмы в электрическую или же, напротив, ускорять плазму с помощью магнитных сил, за счет потребления энергии извне. В этом случае — это уже *ускоритель*, или *инжектор плазмы*. Такой плазменный, или МГД-двигатель, представляет собой по существу аналогию обычного электродвигателя, в котором роль вращающегося якоря играет текущая плазма. При этом так же, как и при удержании плазмы, магнитные поля могут создаваться токами, текущими либо во внешних проводниках, либо в самой плазме.

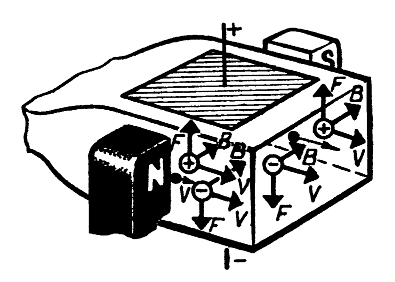


Рис. 69

Обратимся к простой модели, которая поможет нам пояснить суть дела. Представьте себе трубу, заполненную электропроводящей жидкостью. Если пропускать через нее электрический ток, то его взаимодействие с магнитным полем приведет к возникновению силы, которая будет перемещать поток жидкости в направлении, определяемом известным правилом левой руки.

Устройство, работающее на таком принципе и способное перекачивать электропроводящую жидкость (например, жидкий металл), получило название *кондукционного электромагнитного насоса,* а в применении к ускорению плазмы — ускорителя в скрещенных полях. В таком ускорителе ток, текущий через плазму, отделен от тока, генерирующего магнитное поле. Постоянный ток возбуждается внешним электрическим полем и подводится к плазме через электроды.

Конечно, это только один из возможных вариантов. Существуют системы, в которых токи в плазме возбуждаются (индуцируются) переменным магнитным полем. Причем эти токи в свою очередь взаимодействуют с приложенным магнитным полем с целью разгона плазмы. По сути дела имеет место то же самое явление, что и в ускорителе со скрещенными полями: плазма в магнитном поле приходит в движение, но ток здесь не подводится

непосредственно через электроды, а индуцируется в плазме бегущим магнитным полем.

Системы, о которых шла речь, имеют магнитные поля, создаваемые токами в специальных обмотках. Но известны и такие системы, где магнитное поле создается токами, текущими через плазму. Один и тот же ток течет по плазме и образует магнитное поле.

Простейшим примером такой системы является так называемый пинчевый ускоритель. В этом случае циклически повторяющиеся разряды тока (для этого используется батарея конденсаторов) сначала приводят к образованию плазмы (ионизуют и нагревают газ), а затем и внутреннего магнитного поля. Поле это сжимает плазму, и она, как бы под действием своеобразного «магнитного поршня», создающего при этом ударную волну, постепенно ускоряясь, вытекает с большой скоростью из разрядной камеры через сопло.

Получается своего рода плазменная пушка — она действительно время от времени как бы «выстреливает» порции плазмы. Разряд — «выстрел», снова разряд — и снова «выстрел». Из такой пушки можно выстреливать сгустки плазмы со скоростью более 100 км/с. Это в 100 раз быстрее пули и 10 раз быстрее космической ракеты.

Сначала пушку построили для того, чтобы впрыскивать плазму в магнитную ловушку. Но потом поняли, что из нее можно сделать плазменный движитель. Конечно, заставить взлететь с Земли космическую ракету такие двигатели вряд ли смогут: слишком уж мала их тяга. Но взлет — только первая, самая начальная и короткая фаза обычного космического полета. Когда ракета выходит из сферы действия сильных гравитационных полей, даже ничтожно малая сила способна вызвать ускорение корабля. В этих условиях плазменный двигатель сможет сослужить не одну хорошую службу.

Корабли без винта. МГД-движители могут оказать услугу не только космическим, но и подводным кораблям. В таком движителе морская вода ускоряется магнитными силами в результате взаимодействия пропускаемого через воду тока с магнитным полем.

Вот один из проектов реактивной подводной лодки с МГД-движителем. Проточная часть движителя выполняется в виде кольцевого канала, расположенного между

внешним и внутренним корпусами лодки, которые одновременно являются и магнитопроводами движителя (рис. 70). При подаче тока от бортового источника электроэнергии обмотки движителя создают мощное магнитное поле, бегущее от носа лодки к ее корме. В морской воде индуцируются токи. Взаимодействие этих токов с бегущим магнитным полем приводит к появлению в воде магнитной силы, направление которой совпадает с направлением движения поля. И лодка ведет себя подобно кальмару — она как бы отталкивается от воды, приходя таким образом в движение. По расчетам подобный двигатель может обеспечить лодке скорость хода до 90 км/ч.

Наряду с индукционным движителем разрабатывается и движитель кондукционного типа. В этом случае лодка также состоит из внешнего и внутреннего корпусов, между которыми располагаются стержневые постоянные магниты, создающие в канале магнитное поле. Внешний и внутренний корпуса, изолированные при помощи прокладок, представляют собой электроды, на которые подается напряжение таким образом, что ток через морскую воду идет в радиальном направлении. Взаимодействие магнитного поля с током приводит к появлению в морской воде сил, обусловливающих тягу движителя. При семи парах электродов скорость хода судна может достигнуть 70 км/ч.

Однако при использовании постоянных магнитов МГД-движитель окажется неэффективным: магнитное поле слабо, а морская вода имеет низкую электропроводность.

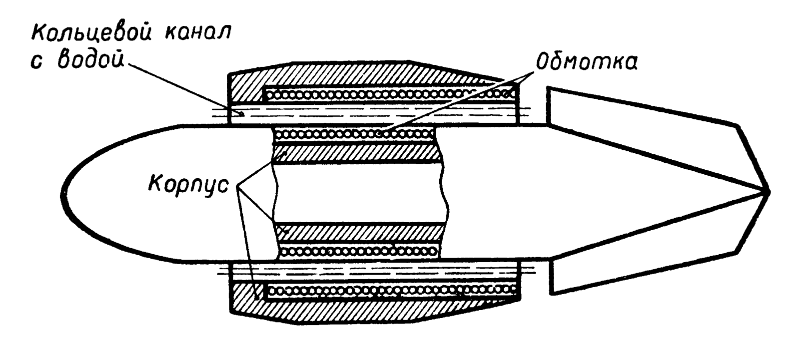


Рис. 70

При применении электромагнитов возникают слишком большие потери в обмотках. Вот почему МГД-движитель до настоящего времени не нашел практического применения. Лишь применение сверхпроводящих магнитных систем, обеспечивающих сильные магнитные поля, сделает реальной идею МГД-движителя — бесшумного, компактного, без вращающихся частей.

* * *

Вот и закончилось наше путешествие в мир магнитов. Можно теперь оглянуться и подвести итоги.

Мы начали с выяснения природы магнита. Логика рассказа шаг за шагом привела нас к величайшим открытиям современности, научным идеям, послужившим основой для создания чудес века — ускорителей, вычислительных машин, установок термоядерного синтеза... По воле автора читателю приходилось заниматься и физикой твердого тела, и ядерной физикой, и электроникой...

Рассказать хотелось о многом. Но пришлось ограничиться основным. Коснуться только фундаментальных идей, послуживших главными вехами на нашем пути. Показать, как одни и те же идеи могут использоваться для самых различных целей. А главное — убедить читателя в том, что мир, где бытуют великаны техники и ее лилипуты, обладает своей внутренней логикой, стержнем, на который нанизано множество приложений, методов и идей.

Конечно, мы рассказали о магните не все; многое удивительное осталось за пределами нашего «маршрута». Мы ничего, или почти ничего, не рассказали о магнитных полях в космосе и в атоме; совсем не коснулись магнитного резонанса — мощного исследовательского метода, с помощью которого ученые разгадывают самые сокровенные секреты строения молекул, кристаллов, биологических объектов; обошли вниманием промышленные методы магнитного анализа структуры металлов и качественного контроля изделий... О многом мы здесь не имели возможности даже упомянуть. Впрочем, тут уместно вспомнить мудрое изречение Козьмы Пруткова: «Нельзя объять необъятное».

Действительно, нельзя. О магните можно рассказывать и рассказывать. Воображению рисуется гигантское

дерево, корни которого уходят глубоко в научную почву. И чем выше это дерево, тем раскидистей его крона, тем больше боковых ветвей расходятся ко всем областям деятельности человека.

Подумать только: гигантский мир магнитов начал осваиваться человечеством всего лишь полтора столетия. Три тысячелетия и полтора столетия. А что будет завтра, через 20 и 30 лет? Что даст магнит XXI в.? На этот вопрос трудно ответить. Ведь еще вчера такие слова, как «магнитная память», «магнитная фокусировка», «плазменный шнур», «МГД»... загадочно произносили лишь герои фантастических романов. Сегодня они в книгах для школьников. И может быть, — как знать — именно тебе, дорогой читатель, предстоит в будущем принять участие в создании еще более удивительных и замечательных устройств. В добрый путь. Желаю успеха.

*

На цветной вклейке показаны: 1. различные применения магнитов в технике; 2, 3. магниты и магнитные поля; 4. ускоритель элементарных частиц (вверху); «Токамак-7» (внизу).

СОДЕРЖАНИЕ

●

Мирон Георгиевич Мнеян

НОВЫЕ ПРОФЕССИИ МАГНИТА

Зав. редакцией *Н. В. Хрусталь*
Редактор *Т. П. Каткова*
Младший редактор *Л. С. Дмитриева*
Художник *С. Ф. Лухин*
Художественный редактор *В. М. Прокофьев*
Технический редактор *Н. А. Киселева*
Корректоры *А. И. Черненко, Р. Б. Штутман*

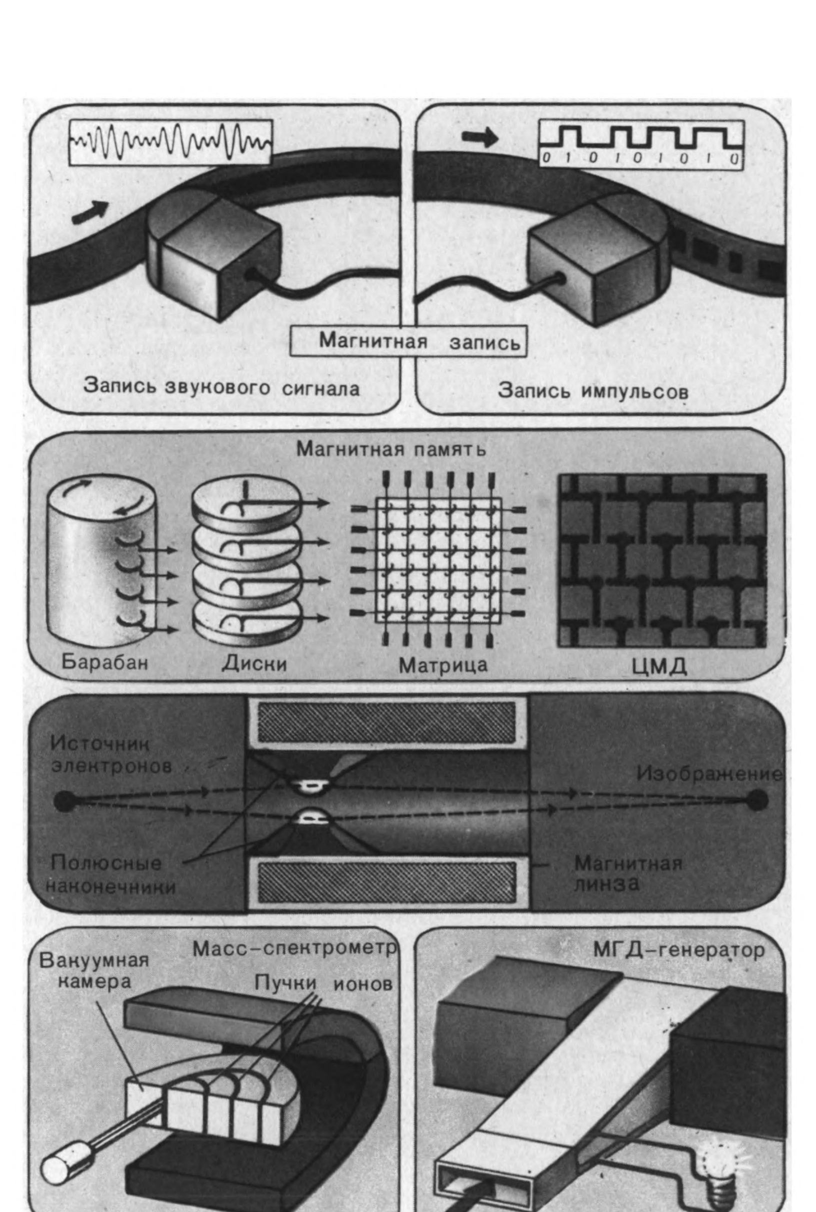
●

ИБ № 8380

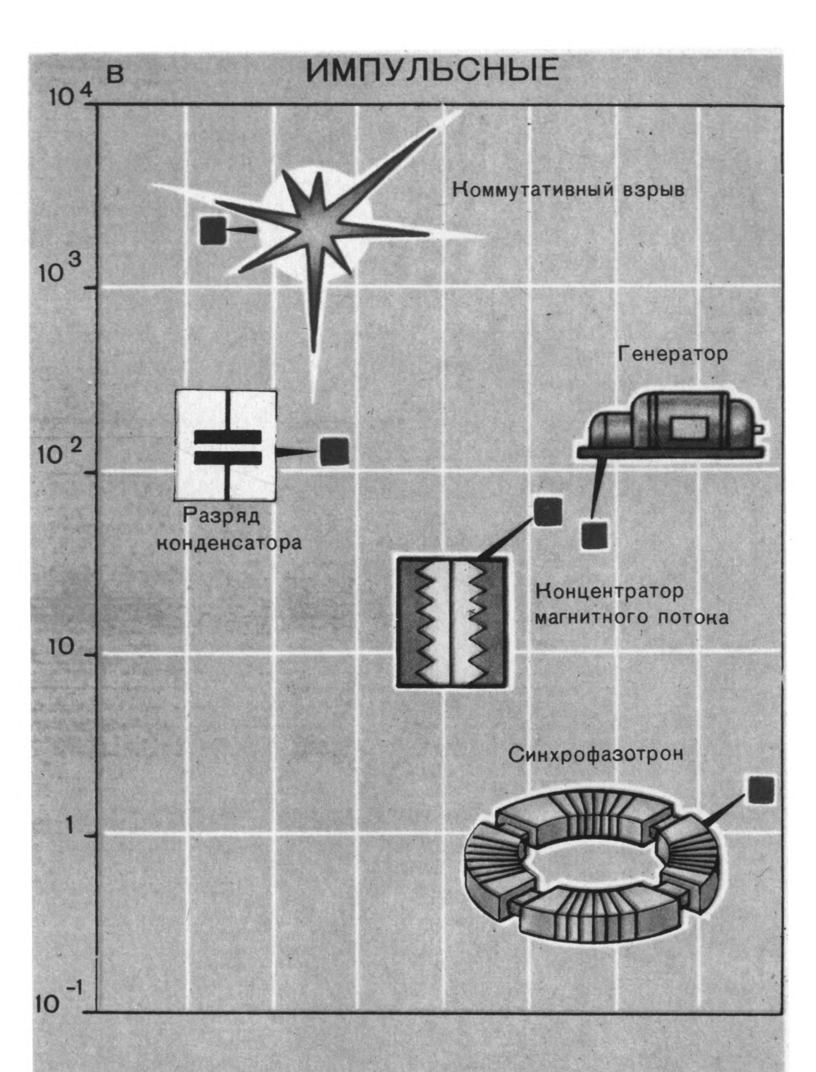
Сдано в набор 29.05.84 Подписано к печати 30.01.85 А12707 Формат 84×108 1/32 Бум кн журн Гарнит литер Печать высокая. Усл печ л 7,56 + вкл 0,21 Усл кр -отт 8,82 Уч -изд. л 8,01 + вкл 0,21 Тираж 140 000 экз Заказ № 514 Цена 30 коп

Ордена Трудового Красного Знамени издательство «Просвещение» Государственного комитета РСФСР по делам издательств, полиграфии и книжной торговли
129846, Москва, 3-й проезд Марьиной рощи, 41

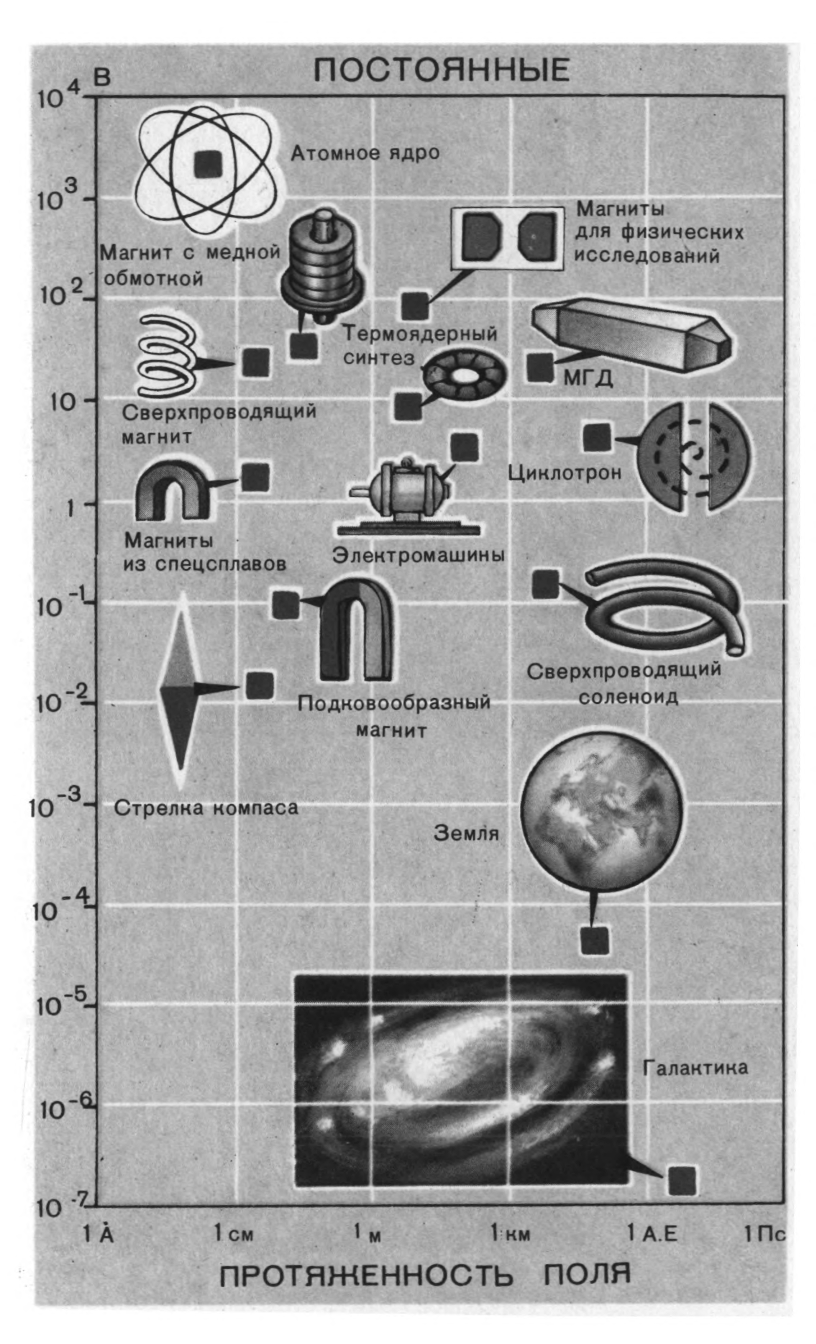
Ярославский полиграфкомбинат Союзполиграфпрома при Государственном комитете СССР по делам издательств, полиграфии и книжной торговли. 150014, Ярославль, ул. Свободы, 97



0 1 0 1 0 1 0 1 0
Магнитная запись
Запись звукового сигнала
Запись импульсов
Магнитная память
Барабан
Диски
Матрица
ЦМД
Источник электронов
Изображение
Полюсные наконечники
Магнитная линза
Масс-спектрометр
Вакуумная камера
Пучки ионов
МГД-генератор



МАГНИТНЫЕ ПОЛЯ


ПОСТОЯННЫЕ
В
10^4
10^3
10^2
10
1
10^{-1}
10^{-2}
10^{-3}
10^{-4}
10^{-5}
10^{-6}
10^{-7}
Атомное ядро
Магнит с медной обмоткой
Магниты для физических исследований
Термоядерный синтез
МГД
Сверхпроводящий магнит
Циклотрон
Магниты из спецсплавов
Электромашины
Сверхпроводящий соленоид
Подковообразный магнит
Стрелка компаса
Земля
Галактика
1 Å
1 см
1 м
1 км
1 А.Е
1 Пс
ПРОТЯЖЕННОСТЬ ПОЛЯ



М. Г. МНЕЯН

Новые профессии магнита